

Einsatzindividuelle Fahrzyklen zur Bewertung der Bremsenergierückgewinnung am Kùhlsattelaufleger

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Thomas Kattenberg (geb. Dopichay)

aus: Hildesheim

eingereicht am: 18.10.2016

mündliche Prüfung am: 03.02.2017

Gutachter: Prof. Dr. Ludger Frerichs
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

2017

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik bzw. nach dessen Umbenennung am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Ludger Frerichs, dem derzeitigen Leiter des Instituts, gebührt mein besonderer Dank für die Ermöglichung der Promotion. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Hans-Heinrich Harms und Herrn Professor Dr.-Ing. Thorsten Lang, unter deren Leitung ich ebenfalls am Institut arbeiten durfte. Ihre äußerst angenehme fachliche und menschliche Unterstützung sowie die Freiräume und die persönliche Förderung während meiner Zeit am Institut haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Ferit Küçükay danke ich herzlich für die Übernahme des Mitberichts, die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Anregungen. Weiterhin danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Vietor für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Allen Projektpartnern, mit denen ich in verschiedenen öffentlich und industriell geförderten Forschungsprojekten zusammenarbeiten durfte, danke ich für die stets zielgerichtete und sehr angenehme Zusammenarbeit sowie alle kritischen Diskussionen und fachlichen Anregungen, die zum erfolgreichen Abschluss der Projekte und auch meiner Promotion beigetragen haben.

Den aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts danke ich für die konstruktive und kollegiale Zusammenarbeit. Die freundschaftliche Atmosphäre und Hilfsbereitschaft im gesamten Institutsteam haben ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und lassen mich die Zeit am Institut in sehr guter Erinnerung behalten.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während meines Studiums und meiner Promotionszeit stets wie selbstverständlich unterstützt hat. Meiner Frau Stephanie danke ich für alle aufmunternden Worte und die Freiräume während der Erstellung dieser Arbeit. Nicht zuletzt diese Unterstützung hat maßgeblich zum Gelingen meiner Promotion beigetragen.

Braunschweig, im April 2017

Thomas Kattenberg

Kurzfassung

Die stetig zunehmende Bedeutung des Kraftstoffverbrauchs schwerer Nutzfahrzeuge im Straßengütertransport bezüglich Betriebskosten, Ressourcenverbrauch und CO₂-Emissionen führt zur Entwicklung immer effizienterer Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen, wobei erreichbare Verbrauchseinsparungen vom tatsächlichen Fahrzeugeinsatz beim Anwender abhängen. Um im Rahmen des Entwicklungsprozesses oder bei der Konfiguration entsprechender Fahrzeuge simulationsgestützte Aussagen zu anwenderspezifischen Einsparpotentialen treffen zu können, sind geeignete einsatzindividuelle Fahrzyklen erforderlich. Standardisierte Fahrzyklen sind hierzu nicht geeignet, da in der Regel eine Abweichung zwischen dem beschriebenen und dem tatsächlichen Einsatz beim Fahrzeugbetreiber besteht.

Die vorliegende Arbeit greift diese Problematik auf und stellt eine Methode zur automatischen Erzeugung einsatzindividueller Fahrzyklen vor. Diese Fahrzyklen sind zur Nachbildung beliebiger Einsatzprofile schwerer Nutzfahrzeuge im Straßengütertransport geeignet und lassen sich zur Simulation des Fahrzeugbetriebs verwenden. Zur Gewährleistung aussagekräftiger und vergleichbarer Ergebnisse geben die Fahrzyklen eine Zielgeschwindigkeit und die Fahrbahnsteigung jeweils über dem Weg vor. Ergänzend sind der Zielgeschwindigkeit kurzzeitige Verzögerungs- und Haltevorgänge in Form sogenannter Events überlagert. Zusätzlich beinhalten die Fahrzyklen einsatzindividuelle Ladevorgänge und den daraus resultierenden variablen Verlauf der Zuladung über der Fahrt. Die Erzeugung der Fahrzyklen basiert auf einer formalen Beschreibung des jeweiligen Fahrzeugeinsatzes und einer hinterlegten Datenbasis. Als Anwendungsbeispiel dient die Bremsenergieerückgewinnung am Kühlsattelaufleger zur elektrischen Versorgung des ansonsten dieselmotorisch betriebenen Kühlaggregats.

Aufbauend auf der einleitenden Darstellung existierender Fahrzyklen und veröffentlichter Ansätze zu deren Erzeugung werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte simulationsbasierte Methode und die Algorithmen zur Generierung der angestrebten einsatzindividuellen Fahrzyklen ausführlich erläutert. Zur nachfolgenden Validierung der Methode und Fahrzyklen wird auf Messergebnisse zur Bremsenergieerückgewinnung am Kühlsattelaufleger zurückgegriffen, die mit einem aufgebauten Versuchsträger in Fahrversuchen gewonnen wurden. Anhand des Abgleichs der Mess- und entsprechend generierter Simulationsergebnisse für ausgewählte Testfahrten konnte die Eignung der Fahrzyklen zur einsatzindividuellen Bewertung der Bremsenergieerückgewinnung am Kühlsattelaufleger erfolgreich nachgewiesen werden. Mit diesem Ergebnis wird die Methode abschließend zur Dimensionierung des Bremsenergieerückgewinnungssystems für zwei exemplarische und realitätsnahe Einsatzprofile angewandt.

Abstract

The increasing importance of fuel consumption for road freight transport in terms of operating costs, finite resources and CO₂-emissions leads to the development of ever more efficient vehicles and vehicle combinations. Possible fuel savings however depend on the actual use i.e. the mission profile of the vehicles by the user. Thus to determine user specific savings within the product development process or while configuring vehicles corresponding mission-specific drive cycles are required. The possibility to apply standardized drive cycles for this purpose is limited, as the vehicle operation described by the drive cycle and the user specific operation typically differ.

Against this background a method to automatically generate mission-specific drive cycles is proposed. The drive cycles can be applied in vehicle simulations and are capable to describe arbitrary mission profiles of heavy duty vehicles in road freight transport. To ensure representative and comparable results the generated drive cycles provide a distance based target speed and road slope. Short-term decelerations, stops and loading as well as unloading processes are additionally superimposed as so-called events. Thereby variable and mission-specific payloads can be described by the drive cycle. The generation of the drive cycles is based on a formal description of the particular mission profile and a previously set up data base, which contains statistics characterizing the target speed, slope and event distribution. The recovery of brake energy on refrigerated semitrailers to electrically supply the otherwise diesel-driven cooling unit serves as example.

Based on the presentation of existing drive cycles and published approaches for their generation the method developed within this thesis is derived. At the same time the overall simulation-based approach and the algorithms for the generation of the mission-specific drive cycles are explained in detail. To demonstrate the feasibility of the brake energy recovery on refrigerated semitrailers and to determine the saving potentials several real world test runs were conducted with a built-up research vehicle. The gathered data and results are subsequently applied to validate the method and the generated drive cycles. By comparing the measured and simulated amounts of recovered energy for specific test runs the suitability of the generated drive cycles for the evaluation of corresponding systems was successfully proven. Finally the developed method is applied to generate drive cycles for exemplary and realistic mission profiles. These drive cycles are then used to identify mission-specific configurations for a brake energy recovery system on semitrailers.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Indizes	III
Abkürzungen	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Zielstellung	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	2
2 Grundlagen und Stand der Technik	4
2.1 Kühlsattelaufleger	4
2.1.1 Definition	4
2.1.2 Aufbau und Funktion	8
2.2 Bremsenergierückgewinnung.....	12
2.2.1 Fahrwiderstände und Energiebilanz	12
2.2.2 Zwischenspeicherung	15
2.2.3 Beispiele und Konzepte am Sattelaufleger.....	16
2.3 Energetisch-orientierte Bewertungsansätze	18
2.3.1 Anwendbare Kriterien	19
2.3.2 Beschreibungsformen des Fahrzeugeinsatzes	20
2.3.3 Methoden zur Ergebnisgewinnung.....	23
2.4 Standardisierte Einsatzbeschreibungen	25
2.5 Methoden zur Erzeugung einsatzindividueller Beschreibungen	31
2.5.1 Deterministische Ansätze	32
2.5.2 Stochastische Ansätze	39
2.6 Fazit.....	41
3 Entwickelte Methode zur einsatzindividuellen Bewertung.....	44
3.1 Zielsetzung und Lösungsansatz.....	44
3.2 Inhalt und Aufbau des Einsatzprofils	48
3.3 Realisierungsform der Fahrzyklen	52
3.4 Anforderungen an die Modellbildung	55

4	Generierung einsatzindividueller Fahrzyklen.....	57
4.1	Ableitung der Datenbasis	57
4.1.1	Klassierung Messdaten.....	57
4.1.2	Beschreibende Kenndaten	59
4.2	Steigungsprofil	67
4.3	Geschwindigkeitsprofil	70
4.4	Events	74
4.5	Exemplarische Fahrzyklen	77
5	Validierung und Anwendung der Methode.....	81
5.1	Feldversuche mit Kùhlsattelaufleger.....	81
5.1.1	Technisches Konzept des Versuchsträgers.....	81
5.1.2	Messmethodik und Messfahrten.....	85
5.2	Realisierung des Simulationsmodells.....	89
5.2.1	Fahrmechanik	90
5.2.2	Antriebsstrang Zugmaschine und Energierückgewinnungssystem	94
5.2.3	Fahrermodell	96
5.3	Validierung der Fahrzyklen und Methode	99
5.4	Weitergehende Analysen.....	102
5.4.1	Zielstellung und Eingangsdaten	102
5.4.2	Ergebnisse für realitätsnahe Einsatzprofile	104
6	Diskussion der Ergebnisse.....	108
6.1	Anwendbarkeit der Methode	108
6.2	Übertragbarkeit auf weitere Problemstellungen.....	109
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	111
8	Literaturverzeichnis	113

Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Einheit	Größe
α	°	Fahrbahnlängsneigung
a	m/s ²	Fahrzeugbeschleunigung
A	m ²	Stirnfläche
c_W	-	Luftwiderstandsbeiwert
Δt	s	Zeitspanne
d_E	min	Eventdauer
η	-	Wirkungsgrad
E_B	Ws	Anteil des Beschleunigungswiderstands an der Traktionsenergie
E_{Bilanz}	Ws	Energiebilanz an der Batterie
E_{ER}	Ws	Zurückgewonnene Bremsenergie elektrisch
E_{KA}	Ws	Elektrischer Energieverbrauch Kühlaggregat
E_L	Ws	Anteil des Luftwiderstands an der Traktionsenergie
E_R	Ws	Anteil des Rollwiderstands an der Traktionsenergie
E_{St}	Ws	Anteil des Steigungswiderstands an der Traktionsenergie
E_{trak}	Ws	Traktionsenergie
$E_{trak,brems}$	Ws	Beim Bremsen freiwerdende Traktionsenergie
$E_{trak,treib}$	Ws	Zum Antrieb aufgewendete Traktionsenergie
f_R	-	Rollwiderstandsbeiwert
F_B	N	Beschleunigungswiderstand
F_L	N	Luftwiderstand
F_R	N	Rollwiderstand
F_{St}	N	Steigungswiderstand
F_x	N	Radumfangskraft

F_Z	N	Radaufstandskraft
F_{Zug}	N	Zugkraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
G_h	m	Grenzwert Höhendifferenz
G_s	m	Grenzwert Streckenlänge
h_{diff}	m	Höhendifferenz
I_{Gen}	A	Gleichgerichteter Strom der Achsgeneratoren
K	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient
K_{Batt}	Ws	Speicherkapazität Batterie
$K_{F,br}$	-	Anteil Bremsstrecke an aktueller Vorausschau
$K_{F,vd}$	-	Faktor zur Anpassung Vorausschau an Geschwindigkeitsdifferenz
λ	-	Drehmassenzuschlagsfaktor
L_{EPF}	m	Streckenlänge eines Segments im Einsatzprofil
μ	-	Kraftschlussbeiwert
m	kg	Gesamtmasse Sattelzug inklusive Zuladung
m_L	kg	Zuladungsmasse
$m_{L,max}$	kg	Maximal zulässige Zuladungsmasse
m_Z	kg	Leermasse Zugmaschine
M_R	Nm	Aktives Drehmoment am Rad
M_{soll}	Nm	Solldrehmoment
n_R	s ⁻¹	Raddrehzahl schlupfbehäftet
n_{R0}	s ⁻¹	Raddrehzahl schlupffrei
p	%	Fahrbahnsteigung
P	W	Leistung
P_{ER}	W	Rückgewinnungsleistung
$P_{Gen,mech}$	W	Mechanische Generatorleistung

P_{KA}	W	Elektrische Leistungsaufnahme des Kühlaggregats
P_{max}	W	Maximalleistung
P_{mr}	W/kg	Verhältnis Antriebsleistung zur Leermasse
P_{nenn}	W	Nennleistung
P_R	W	Radleistung
ρ_L	kg/m ³	Luftdichte
r_R	m	Dynamischer Rollradius
s	m	Strecke
s_E	m	Streckenposition eines Events
s_{vor}	m	Vorausschau Fahrermodell
$s_{vZiel,i}$	m	Streckenlänge je Zielgeschwindigkeitsklasse i
S	-	Radschlupf
SP_h	m	Horizontale Schwerpunktlage der Zuladung hinter der Stirnwand des Sattelauflegers
SP_v	m	Vertikale Schwerpunktlage der Zuladung oberhalb der Ladefläche des Sattelauflegers
t	s	Zeit
t_{treib}	s	Zeitphasen mit antreibender Radleistung
θ	kgm ²	Trägheitsmoment
T_i	°C	Innentemperatur
U_{nenn}	V	Nennspannung
U_{ZWK}	V	Zwischenkreisspannung
v	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{an}	m/s	Anströmgeschwindigkeit
v_E	m/s	Eventgeschwindigkeit
v_{max}	m/s	Maximalgeschwindigkeit
v_{Ziel}	m/s	Zielgeschwindigkeit

Häufige Indizes

Index	Bedeutung
h	Hinterachse Zugmaschine
i	Zählindex
v	Vorderachse Zugmaschine
T, i	Achse i am Trailer bzw. Sattelaufzieger

Kenndaten Fahrzyklen

Zeichen	Beschreibung
EVN_a	Anzahl aller Events je Zielgeschwindigkeitsklasse normiert auf 100 km
EVN_l	Prozentuale Verteilung der Anzahl an Events je relativer wegbasierter Lage
EVN_v	Prozentuale Verteilung der Anzahl an Events je Kombination aus Eventgeschwindigkeit und -dauer
STP_a	Anzahl Steigungssegmente normiert auf 100 km
STP_h	Überwundene Höhendifferenz je Steigungssegment als Funktion der mittleren Steigung
STP_m	Verhältnis der maximalen zur mittleren Steigung je Steigungssegment
STP_v	Häufigkeitsverteilung mittlerer Steigungswerte je Steigungssegment (Mittelwerte und Standardabweichung)
ZGP_a	Anzahl des Vorkommens einer Zielgeschwindigkeitsklasse und Anzahl der Geschwindigkeitswechsel zwischen Zielgeschwindigkeitsklassen normiert auf 100 km
ZGP_s	Streckenanteil je stationärer Zielgeschwindigkeitsklasse an Gesamtstrecke

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ASM	Asynchronmaschine
ATP	Agreement on the international carriage of perishable foodstuffs and on the special equipment to be used for such carriage
BMS	Batteriemanagementsystem
EPF	Einsatzprofil
ELR	European Load Response Test
ESC	European Stationary Cycle
ETC	European Transient Cycle
FZV	Fahrzeug-Zulassungsverordnung
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
Lkw	Lastkraftwagen
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Nkw	Nutzkraftwagen
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
PCA	Principal Component Analysis
Pkw	Personenkraftwagen
SORT	Standardized On-Road Test
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
VECTO	Vehicle Energy Consumption Calculation Tool
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung

Weltweit ist eine immer striktere Regulierung der Emissionen von Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen zu beobachten. Zusätzlich rückt vor dem Hintergrund des Klimawandels, der Verknappung fossiler Energieträger und zu erwartenden Preissteigerungen der Kraftstoffverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß immer weiter in das Interesse des Gesetzgebers sowie der Fahrzeughersteller und -betreiber. Sowohl für den Pkw-Bereich als auch für leichte Nutzfahrzeuge wurde in der Europäischen Union bereits eine Regulierung der CO₂-Emissionen beschlossen [EGR09], für schwere Nutzfahrzeuge sind seitens der Europäischen Kommission entsprechende Strategien zur Reduktion der CO₂-Emissionen in Vorbereitung [COM14]. Parallel besteht seitens der Fahrzeugbetreiber von sich aus ein erhebliches Interesse zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs, da die korrespondierenden Kosten einen Großteil der gesamten Betriebskosten ausmachen [Wit11].

Dies führt im Nutzfahrzeugsbereich zur Entwicklung immer effizienterer Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen. Beispiele technischer Maßnahmen sind Wirkungsgradsteigerungen im konventionellen Antriebsstrang, die Verbesserung der Aerodynamik und des Rollwiderstands, Leichtbau, prädiktive Tempomaten oder auch die Rückgewinnung und Nutzung ansonsten dissipierter Energie [Dün15]. Zur letztgenannten Maßnahme zählt u.a. die in Hybrid- oder Elektrofahrzeugen übliche Rückgewinnung von Bremsenergie oder die Nutzbarmachung der Abgaswärme des Verbrennungsmotors. Erreichbare Energie- und Kraftstoffeinsparungen hängen für alle technischen Einzelmaßnahmen und Kombinationen der Maßnahmen vom tatsächlichen Einsatzprofil des Fahrzeugs beim Anwender ab. Einflussgrößen sind u.a. variable Zuladungen, Fahrtlängen, befahrene Streckenarten und deren Anteile, Stillstandszeiten, Pausen, die Fahrweise des Fahrers und nicht zuletzt regionale Einsatzbedingungen, wie bspw. die Topographie. Eine anwendergerechte Auslegung oder Konfiguration von Fahrzeugen erfordert somit eine einsatzindividuelle und auf den Anwender ausgerichtete Betrachtung.

Sollen diese einsatzindividuellen Betrachtungen simulationsgestützt erfolgen, so werden entsprechende Fahrzyklen zur hinreichend genauen Beschreibung der realen Fahrzeugeinsätze benötigt. Standardisierte Fahrzyklen, wie sie zur Emissionsmessung oder Verbrauchsbestimmung verwendet werden, sind hierzu nicht oder nur bedingt geeignet, da immer eine Abweichung zum realen Fahrzeugeinsatz bestehen wird. Grundsätzlich besteht in diesem Zusammenhang das Problem, dass durch eine begrenzte Anzahl an Fahrzyklen die gesamte Einsatzvielfalt schwerer Nutzfahrzeuge mit ihren spezifischen Ausprägungen nicht abgebildet werden kann. Mit dem Ziel der Generierung aussagekräftiger Ergebnisse für ein anwenderspezifisches Einsatzprofil wird somit eine Methode zur Erzeugung einsatzindividueller Fahrzyklen benötigt.

Als Lösungsbeitrag für die genannte Problemstellung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Methode vorgestellt, mit der sich beliebige Fahrzeugeinsätze schwerer Nutzfahrzeuge im

Gütertransport formal beschreiben lassen und mit der korrespondierende Fahrzyklen synthetisch erzeugt werden können. Zentrales Element der Methode ist die automatisierte Erzeugung der genannten Fahrzyklen auf Basis einer standardisierten Einsatzprofilbeschreibung und einer vorab hinterlegten Datenbasis. Die erzeugten Fahrzyklen können zur einsatzindividuellen und simulationsbasierten Auslegung und Bewertung effizienzsteigernder Maßnahmen im beschriebenen Fahrzeugeinsatz herangezogen werden. Durch Berücksichtigung der wesentlichen Einflussfaktoren des Fahrzeugeinsatzes und die Möglichkeit, diese separat zu betrachten und zu variieren, kann in der Fahrzeugentwicklung ein ganzheitliches Systemverständnis durch Aufzeigen von Abhängigkeiten und Sensitivitäten aufgebaut werden. Auf dieser Grundlage kann die angestrebte anwendergerechte Auslegung erfolgen.

Als Anwendungsbeispiel der Methode dient im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Rückgewinnung von Bremsenergie am Kühlsattelaufleger. Durch elektrische Generatoren an den Achsen eines Kühlsattelauflegers wird freiwerdende Bremsenergie zurückgewonnen, in einer Batterie zwischengespeichert und anschließend zur Versorgung des ansonsten dieselmotorisch betriebenen Kühlaggregats zur Verfügung gestellt. Die sich einstellende Energiebilanz aus zurückgewonnenen und genutzten Energiemengen wird wesentlich durch den Fahrzeugeinsatz beeinflusst. Dies macht eine einsatzindividuelle Betrachtung und Auslegung eines entsprechenden Systems erforderlich, wozu die entwickelte Methode verwendet werden soll.

1.2 Aufbau der Arbeit

Einleitend wird im zweiten Kapitel auf die Einordnung von Kühlsattelauflegern in die Fahrzeugklasse der schweren Nutzfahrzeuge sowie deren Aufbau und Funktion eingegangen. Anschließend werden anhand der Fahrwiderstandsgleichung die theoretischen Grundlagen der Rückgewinnung von Bremsenergie erläutert und ausgeführte technische Realisierungsbeispiele an Sattelauflegern vorgestellt. Mit dem Fokus auf einer einsatzindividuellen Betrachtung werden im weiteren Verlauf gängige Bewertungskriterien, Methoden zur Ergebniserzielung und mögliche Beschreibungsformen des Fahrzeugeinsatzes beschrieben. Insbesondere wird auf Methoden zur Erzeugung einsatzindividueller Fahrzyklen zwecks Simulation des Fahrzeugbetriebs eingegangen.

Im dritten Kapitel wird ausgehend vom dargestellten Stand der Technik detailliert auf die behandelte Problem- und Zielsetzung sowie die Notwendigkeit einer einsatzindividuellen Betrachtungsmöglichkeit eingegangen. Darauf aufbauend werden der entwickelte Lösungsansatz sowie dessen wesentliche Bestandteile vorgestellt. Insbesondere wird auf die Systemgrenzen der Betrachtung, die Definition des Einsatzprofils, die Form der Fahrzyklen und auf ansatzspezifische Anforderungen an die Modellbildung und Simulation eingegangen.

Das vierte Kapitel behandelt die Methoden zur Erzeugung der einsatzindividuellen Fahrzyklen. Zunächst wird auf die hinterlegte Datenbasis eingegangen und es wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem sich diese auf Basis von Messdaten erzeugen lässt. Anschließend wird unter Verwen-

derung der Datenbasis jeweils separat das Vorgehen zur Erzeugung der Zyklusbestandteile (Steigungsprofil, Geschwindigkeitsprofil, Events) erläutert. Parallel erfolgt eine kritische Bewertung der spezifischen und aus dem Ansatz zur Erzeugung resultierenden Eigenschaften der Zyklen.

Das fünfte Kapitel beschreibt die Validierung und Anwendung der Methode am Beispiel der Energierückgewinnung am Kühlturmsauflieger. Zu diesem Zweck werden einleitend ein aufgebauter Versuchsträger und durchgeführte Messfahrten mitsamt den jeweiligen Ergebnissen vorgestellt. Nach erfolgter Validierung wird die Methode weitergehend angewendet, um systematisch das Potential eines entsprechenden Systems in verschiedenen Konfigurationen und Einsatzprofilen zu bestimmen.

Abschließend werden im sechsten Kapitel die generelle Anwendbarkeit und die Übertragbarkeit der Methode auf andere, von der Energierückgewinnung abweichende, technische Fragestellungen kritisch reflektiert, bevor die Arbeit im siebten Kapitel mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick endet.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel umfasst die Darstellung der Grundlagen zur Rückgewinnung von Bremsenergie und zur energetischen Bewertung von Fahrzeugen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf standardisierten Einsatzbeschreibungen und Methoden zur Erzeugung einsatzindividueller Beschreibungsformen, die als Grundlage der Bewertung herangezogen werden. Zur Eingrenzung des Themengebiets wird einleitend auf die Begriffsdefinitionen des Kühlsattelauflegers sowie dessen Funktion und Aufbau eingegangen.

2.1 Kühlsattelaufleger

2.1.1 Definition

Kühlsattelaufleger oder auch Kühlsattelanhänger sind der Fahrzeugklasse der Nutzfahrzeuge zugeordnet. Ihre Aufgabe besteht im temperaturgeführten Transport von Gütern. Eine Definition kann damit sowohl fahrzeug- als auch aufgabenbezogen erfolgen. Zunächst wird auf die fahrzeugseitige Definition des Sattelauflegers bzw. Sattelanhängers als Unterkategorie des Nutzfahrzeugs eingegangen.

Laut DUDEN handelt es sich bei einem Nutzfahrzeug um ein „Kraftfahrzeug, das zur Beförderung von Gütern oder Personen genutzt wird“ [Sta07]. Nutzfahrzeuge sind demnach u.a. Kleintransporter, Lastkraftwagen und Busse. Das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) enthält zusammen mit der Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV) eine weitere Konkretisierung. Nach FZV ist ein Kraftfahrzeug ein nicht dauerhaft spurgeführtes Landfahrzeug, das durch Maschinenkraft bewegt wird [FZV11]. Laut PBefG werden Kraftfahrzeuge, „die nach Bauart und Einrichtung zur Beförderung von Gütern bestimmt sind“ [PBG61] als Lastkraftwagen (Lkw) bezeichnet. Ein Anhänger wird darüber hinaus als Fahrzeug definiert, welches zum Anhängen an Kraftfahrzeuge geeignet und bestimmt ist. Ist das Kraftfahrzeug überwiegend zum Ziehen von Anhängern bestimmt, handelt es sich um ein Zugfahrzeug. Der Sattelanhängers hingegen ist eine spezielle Bauform des Anhängers, der teilweise auf dem Zugfahrzeug aufliegt und dessen Gewicht anteilig durch das Zugfahrzeug getragen wird. Entsprechende Zugfahrzeuge werden Sattelzugmaschinen genannt und die Kombinationen aus Sattelanhängers und Sattelzugmaschine heißen Sattelzug [FZV11]. Auch die DIN 70010 zur Systematik der Straßenfahrzeuge unterscheidet zwischen Kraftfahrzeugen und Anhängersfahrzeugen, wobei der Sattelanhängers als eine mögliche Ausprägung des Anhängersfahrzeugs definiert wird [DIN70].

KELP führt in seiner Analyse strategischer Handlungsfelder der europäischen Lkw-Industrie [Kel00] eine Systematisierung der Automobilindustrie durch, die sich auch auf das Fahrzeug übertragen lässt (s. Bild 2.1). KELP differenziert innerhalb der Gruppe der Nutzkraftwagen (Nkw) u.a. zwischen Lastkraftwagen, die zum Transport von Gütern bestimmt sind, und Zugmaschinen, die ausschließlich oder überwiegend dem Mitführen von Anhängern dienen [Kel00]. Zugmaschinen können sowohl als Anhänger- oder Sattelzugmaschine ausgeführt sein,

wobei erstere auch Güter auf einer fahrzeugeignen Ladefläche befördern können. Bei Sattelanhängern handelt es sich nach KELP um Anhängefahrzeuge, die nicht-selbstfahrend sind und stattdessen von einem Kraftfahrzeug mitgeführt werden. Wesentliches Merkmal der Sattelanhänger ist analog obiger Definition die Tatsache, dass ein wesentlicher Teil des Gesamtgewichts auf die Sattelzugmaschine übertragen wird [Kel00].

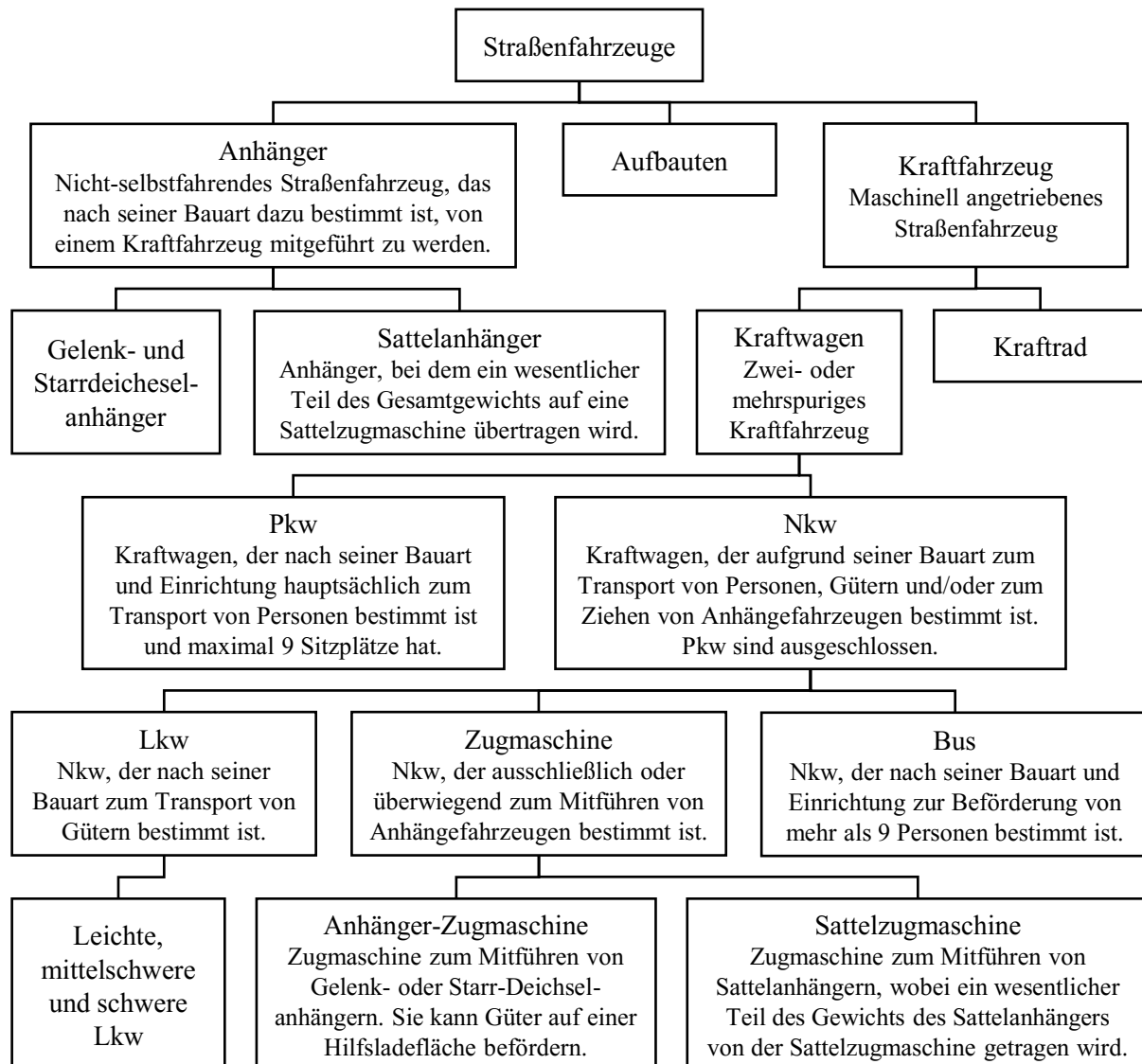


Bild 2.1: Systematisierung der Straßenfahrzeuge in Anlehnung an [Kel00]

Wie Bild 2.1 zu entnehmen ist, führt KELP auch eine Unterscheidung der Lkw nach leichten, mittelschweren und schweren Fahrzeugen durch. Eine alternative Einordnung anhand des Gewichts, die auch den Anhänger mit einbezieht, geben die Fahrzeugklassen nach EG-Richtlinie 2007/46/EG. Kraftfahrzeuge zur Güterbeförderung mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) über 12 t gehören demnach der Klasse N3 der schweren Lkw an. Bei Anhängern handelt es sich um schwere Anhänger der Klasse O4, wenn die zulässige Gesamtmasse 10 t überschreitet [EGR93].

Die gesetzlich zulässigen Massen und Maße von Kraftfahrzeugen und Anhängern werden in der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) geregelt. Die zulässigen Achslasten und die zulässige Gesamtmasse sind in §34 der StVZO u.a. in Abhängigkeit der Achsform (Einfach-, Doppel- oder Dreifachachse), dem Achsabstand, der Federungsart (Stahl- oder Luftfeder) oder dem Einsatzzweck (gelenkte oder angetriebene Achse) festgelegt. Für einen typischen Sattelanhänger mit Dreifachachse und einem Achsabstand zwischen 1,3 m und 1,4 m liegt die zulässige Achslast bei 24 t. Das Gesamtgewicht des entsprechenden Sattelzugs darf 40 t (im kombinierten Verkehr 44 t) nicht überschreiten [SVZ12]. Die zulässigen Abmessungen von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen legt §32 der StVZO fest. So liegt die höchstzulässige Länge von Sattelzügen bei 16,50 m, sofern am Sattelanhänger der Abstand zwischen der Achse des Königszapfens und der hinteren Fahrzeugbegrenzung von 12,00 m und der vordere Überhangradius von 2,04 m nicht überschritten werden [SVZ12]. Die maximale Fahrzeugbreite ohne Außenspiegel darf 2,55 m nicht überschreiten. Eine größere Außenbreite von 2,60 m ist „bei festen oder abnehmbaren Aufbauten von klimatisierten Fahrzeugen, die für die Beförderung von Gütern in temperaturgeführtem Zustand ausgerüstet sind und deren Seitenwände einschließlich Wärmedämmung mindestens 45 mm dick sind“ [SVZ12] zulässig. Dies führt beim Sattelanhänger in Kombination mit den Längenvorschriften zu typischen Aufbauhöhen von 13,60 m.

Letztgenannte Regelung der StVZO zur Fahrzeugbreite leitet von der allgemeingültigen Definition eines Sattelanhängers zur aufgabenbezogenen Definition des Kühlsattelanhängers über. Demnach handelt es sich bei einem Kühlsattelanhänger um einen Sattelanhänger mit klimatisiertem festem Aufbau zum temperaturgeführten Transport von Gütern. Bei temperaturgeführten Gütern kann es sich um frische oder tiefgekühlte verderbliche Lebensmittel, um Pharmaprodukte wie z.B. Medikamente oder um weitere Güter mit speziellen Anforderungen an die Transporttemperatur, wie bspw. Grünpflanzen, handeln. Das „AGREEMENT ON THE INTERNATIONAL CARRIAGE OF PERISHABLE FOODSTUFFS AND ON THE SPECIAL EQUIPMENT TO BE USED FOR SUCH CARRIAGE“ (ATP) definiert u.a. Kategorien der eingesetzten Ausrüstung zum temperaturgeführten Transport verderblicher Lebensmittel, zu welcher auch Kühlsattelanhänger gehören. Unterschieden wird zwischen isolierter, gekühlter, mechanisch angetriebener gekühlter und geheizter Ausrüstung [ATP10]. Isolierte Ausrüstung wird anhand des Wärmeübergangskoeffizienten K des Aufbaus in normal und stark isoliert eingeteilt. Um stark isolierte Ausrüstung handelt es sich, sobald der Wärmeübergang zwischen dem Innenraum des Aufbaus und der Umgebung auf einen Wert von kleiner oder gleich $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ begrenzt werden kann und die Seitenwände eine Dicke von mindestens 45 mm aufweisen. Gekühlte Ausrüstung nutzt einen isolierten Aufbau und eine Kältequelle. Mögliche Kältequellen sind Eis, Trockeneis, eutektische Platten oder verflüssigtes Gas. Ausgenommen sind an dieser Stelle explizit mechanisch angetriebene Kältequellen. Anhand der erreichbaren und haltbaren Innenraumtemperatur bei einer mittleren Außentemperatur von 30°C und leerem Aufbau erfolgt eine Einteilung in die Klassen A bis D, wie Tabelle 2.1 zu entnehmen. Für die

Klassen B und C wird ein stark isolierter Aufbau vorgeschrieben. Eine analoge Klassierung bei ebenfalls 30 °C Außentemperatur und leeren Aufbau liegt für mechanisch angetriebene gekühlte Ausrüstung vor, wie ebenfalls Tabelle 2.1 zeigt. Unter mechanisch angetriebener gekühlter Ausrüstung werden isolierte Aufbauten verstanden, die mit einem eigenen Kälteaggregat (z.B. einem mechanischen Kompressor) ausgestattet sind oder im Verbund mit anderer Ausrüstung durch ein entsprechendes Aggregat versorgt werden. Zur Klassierung wird zusätzlich anhand der Möglichkeiten unterschieden, eine Innentemperatur innerhalb eines gegebenen Intervalls wählen zu können oder lediglich eine maximal zulässige Temperatur nicht zu überschreiten.

Tabelle 2.1: Klassierung gekühlte Ausrüstung anhand erreich- und haltbarer Innentemperatur T_i bei 30 °C Außentemperatur nach [ATP10]

Gekühlt		Mechanisch angetrieben			
Klasse	T_i maximal	Klasse	T_i wählbar	Klasse	T_i maximal
A	7 °C	A	$12\text{ °C} > T_i \geq 0\text{ °C}$	D	0 °C
B *	-10 °C	B *	$12\text{ °C} > T_i \geq -10\text{ °C}$	E *	-10 °C
C *	-20 °C	C *	$12\text{ °C} > T_i \geq -20\text{ °C}$	F *	-20 °C
D	0 °C				

* stark isolierte Aufbauten mit $K \leq 0,4\text{ W/m}^2\text{K}$ gefordert

Unter der letzten Gruppe der geheizten Ausrüstung werden isolierte Aufbauten verstanden, deren Innenraumtemperatur bei leerem Aufbau auf 12 °C angehoben und für mindestens 12 Stunden ohne erneute Energiezufuhr gehalten werden kann. Anhand der herrschenden Außentemperatur erfolgt eine Einteilung in die Klassen A (Außentemperatur -10 °C) und B (Außentemperatur -20 °C). Für Klasse B werden stark isolierte Aufbauten vorgeschrieben [ATP10].

Neben der zuvor genannten Richtlinie zum Transport verderblicher Lebensmittel existieren auch für andere Güter Regularien. Exemplarisch sei die Richtlinie 2013/C 343/01 der Europäischen Union zur guten Vertriebspraxis von Humanmedizinprodukten genannt, die u.a. den Transport entsprechender Produkte regelt. So sollen bspw. für den Transport temperaturempfindlicher Produkte geeignete Ausrüstungen verwendet werden, zu denen auch Fahrzeuge mit Temperaturkontrolle gehören. Eine darüber hinausgehende Definition findet allerdings nicht statt [EGR13].

Nach Statistik des Kraftfahrt-Bundesamts [KBA13] wurden im Jahr 2013 in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt 26.983 Sattelanhänger neu zugelassen. Davon besitzen 26.424 Fahrzeuge (ca. 98 %) eine zulässige Gesamtmasse über 10t, womit sie der Fahrzeugklasse der schweren Anhänger zuzuordnen sind. Von den schweren Sattelanhängern verfügen wiederum 4664 Fahrzeuge (ca. 18 %) über einen isolierten Aufbau. Bei diesen Fahrzeugen mit isoliertem Aufbau haben lediglich 742 Fahrzeuge keine Kühlung, womit etwa 84 % über eine Kühlung verfügen.

Aufgrund von Überschneidungen mit der Fahrzeugklasse der Nutzfahrzeuge sei an dieser Stelle ergänzend auf die Klasse der mobilen Arbeitsmaschinen verwiesen. Entsprechend einer möglichen Definition nach [Lan02] oder [Mar05] steht bei mobilen Arbeitsmaschinen, wie beispielsweise Land- oder Baumaschinen, die Verrichtung eines Arbeitsprozesses im Vordergrund. Die Mobilität wird lediglich zur Verrichtung des Arbeitsprozesses und/oder zum Wechsel des Einsatzorts benötigt und bedingt, dass die Energieversorgung nicht stationär erfolgen kann. Eine mögliche Überschneidung mit der Fahrzeugklasse der Nutzfahrzeuge wird durch LANG am Beispiel eines Universalgeräteträgers mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit über 60 km/h verdeutlicht, der verkehrsrechtlich als Lastkraftwagen eingestuft wird und sowohl zum Transport von Gütern als auch zum Ziehen von Anhängern eingesetzt werden kann. Temporär können entsprechende Fahrzeuge allerdings auch als mobile Arbeitsmaschine betrachtet werden, wenn sie beispielsweise mit einem angebauten Randstreifenmäher betrieben werden [Lan11]. Ein weiteres Beispiel für die Parallelität beider Definitionen ist das Müllsammelfahrzeug. Während des Sammelbetriebs liegt der Fokus auf dem Arbeitsprozess des Aufnehmens und Verdichtens von Müll, das Fahren dient lediglich diesem Arbeitsprozess. Bei der Fahrt vom Sammelgebiet zur Deponie steht wiederum die Transportaufgabe eines Nutzfahrzeugs im Vordergrund. Beim Kühlsattelanhängers kann das Aufnehmen und Temperieren der Ladung ebenfalls als Arbeitsprozess angesehen werden, wobei allerdings der eigentliche und mit einem Ortswechsel verbundene Transport im Zusammenspiel mit der Sattelzugmaschine die wesentliche Aufgabe ist.

2.1.2 Aufbau und Funktion

Im Folgenden wird der technische Aufbau typischer Kühlsattelaufleger, wie in Bild 2.2 gezeigt, beschrieben werden. Entsprechende Fahrzeuge bestehen im Wesentlichen aus dem Fahrgestellrahmen und Fahrwerk, dem isolierten und fest mit dem Fahrgestellrahmen verbundenen Aufbau zur Aufnahme der Ladung und dem dieselbetriebenen Kühlaggregat.

Der Aufbau des Fahrgestellrahmens, des Fahrwerks und des isolierten Aufbaus ist ausführlich in Standardwerken wie bspw. [App08] beschrieben, weshalb an dieser Stelle nur knapp darauf eingegangen wird. Für den Fahrgestellrahmen werden in der Regel Leiterrahmen aus Stahl bestehend aus zwei Längsträgern und mehreren Querträgern eingesetzt. Die Fahrgestellrahmen können entweder selbsttragend ausgeführt sein oder der Aufbau kann, wie beim Kühlsattelaufleger üblich, einen Teil der eingeleiteten Kräfte aufnehmen. Im vorderen Bereich des Fahrgestellrahmens sind der sogenannte Königszapfen und die Schleifplatte angebracht, welche die Verbindung zur Sattelpkupplung der Zugmaschine herstellen. Der Königszapfen überträgt die auftretenden Kräfte in Längs- und Querrichtung und verhindert, dass der Sattelaufleger in vertikaler Richtung von der Sattelpkupplung abhebt. In der Regel liegt jedoch der Sattelaufleger mit seiner Schleifplatte auf der Sattelplatte der Zugmaschine auf. Wie in Kapitel 2.1.1 bereits beschrieben trägt damit die Sattelzugmaschine ein Teil des Gesamtgewichts aus Fahrzeug und Ladung.



Bild 2.2: Kühlsattelaufleger ohne Zugmaschine

Im hinteren Drittel des Sattelauflegers ist das Fahrwerk bestehend aus Achsen, Federn, Stoßdämpfern, Reifen und der Bremse angebracht. Die Fahrzeuge sind größtenteils mit Starrachsen ausgerüstet, zur Verbesserung der Manövrierfähigkeit und zur Verringerung des Reifenverschleißes kommen gelenkte Nachlaufachsen zum Einsatz. Zusätzlich können einzelne Achsen als Liftachse ausgeführt sein. Im Fernverkehrseinsatz werden Sattelaufleger größtenteils mit drei Achsen ausgerüstet, im Verteilerverkehr sind dagegen auch weniger Achsen möglich. Moderne Sattelaufleger für den europäischen Markt verfügen in der Regel über eine Luftfederung, pneumatisch aktuierte Scheibenbremsen, die vom elektronischen Bremsensystem (EBS) angesteuert werden, und Einzelbereifung. Vor den Achsen befindet sich meist ein Stauraum zu Unterbringung leerer Paletten (Palettenkasten), der Tank für den Dieselmotorkraftstoff des Kühlaggregats und absenkbare Stützen, um den Sattelaufleger wie in Bild 2.2 gezeigt ohne Sattelzugmaschine abstellen zu können.

Beim Aufbau von Kühlsattelauflegern handelt es sich um sogenannte isolierte Kofferaufbauten. Diese bestehen überwiegend aus zwei Seitenwänden, einer Stirnwand, dem Dach, einer Unterkonstruktion und einer Rückwand mit Türen, womit die Beladung über das Fahrzeugheck erfolgt. Eingesetzt werden Sandwichplatten aus einem festen und widerstandsfähigen Deckmaterial (z.B. Stahl- oder Aluminiumblech, GFK-Laminat) und einem isolierenden Kernmaterial (z.B. Polyurethan, Polystyrol, Schäume aus PVC oder Phenol) [App08] [Tas09], deren Dicke sich nach der zu erreichenden Isolationswirkung richtet (vgl. Klassierung nach ATP). Zur Ladungssicherung und zum Transport spezieller Güter sind in die Innenseite der Wände geeignete Vorrichtungen eingelassen. Zum gleichzeitigen Transport von Gütern mit verschiedenen Temperaturanforderungen lässt sich bei entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen der Innenraum mittels Trennwänden unterteilen. Dies erfordert ein Kühlaggregat, das zur individuellen Kühlung der abgetrennten Bereiche in der Lage ist.

Das Kühlaggregat ist bei Kühlsattelaufliegern meist an der Stirnwand des Fahrzeugs befestigt (s. Bild 2.2). Bei schweren Fahrzeugen handelt sich in der Regel um autarke Einheiten, die unabhängig von der Sattelzugmaschine eine in Grenzen frei programmierbare Soll-Innenraumtemperatur sowohl im Fahr- als auch im Standbetrieb des Sattelauflegers einregeln können [Hea10]. Für die Festlegung der Soll-Innenraumtemperatur sind die jeweiligen Anforderungen seitens des transportierten Gutes ausschlaggebend. Die gekühlte bzw. temperierte Luft wird in einem geschlossenen Kreislauf durch eine Öffnung an der Stirnwand in den Innenraum des Aufbaus eingeblasen, über Leitelemente möglichst gleichmäßig in diesem verteilt und anschließend wieder angesaugt. Die Kühlaggregate arbeiten größtenteils nach dem Prinzip der Kompressionskältemaschine [Tas09], [Hea10]. Ein mechanisch angetriebener Kältekompressor verdichtet ein Arbeitsmedium im geschlossenen Kreis bis zur Verflüssigung und bringt es dadurch auf ein hohes Temperaturniveau. In einem folgenden Wärmetauscher kann es dadurch Wärme an die Außenluft abgeben. Anschließend wird das Arbeitsmedium im Verdampfer entspannt und es nimmt beim Übergang von der flüssigen zur gasförmigen Phase Wärme aus der Innenraumluft auf niedrigem Temperaturniveau auf. Bei Fahrzeugen mit unterteilten Innenräumen zum gleichzeitigen Transport von Gütern mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen findet sich je Innenraum ein separater Verdampfer inklusive Gebläse. Zusätzlich können Heizelemente vorhanden sein, um den Aufbau über die Außentemperatur hinaus zu erwärmen.

Die Antriebsleistung wird beim Großteil der Kühlaggregate von einem internen Dieselmotor bereitgestellt, der beispielsweise über Riementriebe oder eine elektrische Generator-Motor-Kombination mit den einzelnen Aggregaten, wie dem Kältekompressor oder verschiedenen Gebläsen, verbunden ist. Je nach erforderlicher Kälteleistung und Größe des zu kühlenden Volumens werden Dieselmotoren mit einer Leistung von bis zu 26 kW eingesetzt [Bar09b], [Dwy05]. Zwecks lokal emissionsfreier Energieversorgung im Stand des Fahrzeugs verfügen Kühlaggregate in Europa häufig über eine Steckdose zum Anschluss an das 3-Phasen-Drehstromnetz, womit der Antrieb der internen Aggregate elektrisch erfolgt. Allgemein entspricht dies der Definition mechanisch angetriebener Aggregate nach ATP [Hea10]. Kühlaggregate können meist in verschiedenen Betriebsmodi arbeiten, die Einfluss auf den Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch und die Güte der Temperaturregelung haben. Im Intervallbetrieb pendelt die Ist-Temperatur beispielsweise zwischen einer oberen und unteren Grenze, das Kühlaggregat wird intermittierend als Zweipunktregler betrieben. Im Dauerlaufbetrieb wird demgegenüber ununterbrochen und bedarfsgerecht Kälte- oder auch Wärmeleistung erzeugt, sodass die Soll-Temperatur ohne nennenswerte Abweichungen gehalten werden kann. Im Dauerlaufbetrieb ist demgegenüber der Kraftstoffverbrauch in der Regel höher als im Intervallbetrieb. Zusätzlich wird der Dieselmotor typischerweise in Abhängigkeit der erforderlichen Kälteleistung auf verschiedenen Drehzahlniveaus betrieben [Kul07], die ebenfalls einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben [Bar09b]. Neben dem gewählten Betriebsmodus beeinflussen viele weitere Faktoren den Bedarf an Kälteleistung und damit den Kraftstoffverbrauch sowie die Emissionen, wie beispielsweise [Tas09], [Hea10], [Dwy05] und [Mad07] ausführen. Einflussgrößen sind

u.a. die Differenz zwischen der transportgutabhängigen Innentemperatur und der Außentemperatur, die Sonneneinstrahlung, die Fahrgeschwindigkeit, die Masse und Temperatur der Ladung zum Zeitpunkt der Beladung und deren Wärmekapazität oder die einsatzbedingte Anzahl an Türöffnungen bei Be- und Entladevorgängen.

Tabelle 2.2: Typische Kraftstoffverbräuche im temperaturgeführten Transport nach Fahrzeugklasse nach [Tas09]

Fahrzeugklasse	Fahrstrecke (km/Tag)	Verbrauch Fahren (l/100km)	Verbrauch Kühlen (l/Tag)	Verbrauch Fahren und Kühlen (l/100km)	Verhältnis Kühlen zu Fahren (%)
Mittelschwere Lkw	409	27,2	21,0	32,4	18,9
Schwere Lkw	286	31,7	17,7	37,9	19,5
Sattelzug City	335	33,5	26,1	41,3	23,2
Sattelzug 32 t zGG	419	33,6	34,1	41,7	24,2
Sattelzug 38 t zGG	486	32,8	24,9	38,0	15,6

Gemittelte Kraftstoffverbräuche für den Fahrtrieb und das Kühlaggregat verschiedener Fahrzeugtypen mit ihren spezifischen Einsatzprofilen und unterschiedlichen zulässigen Gesamtgewichten fasst Tabelle 2.2 zusammen. Bei den Sattelzügen liegen die Verbräuche des Kühlaggregats demnach zwischen 25 und 34 Litern Diesel pro Tag. Unterschiede im Verbrauch zwischen den Fahrzeugklassen resultieren u.a. aus den unterschiedlichen Einsatzprofilen. So ist bei den leichteren und überwiegend im Verteilerverkehr eingesetzten Fahrzeugen von einer im Vergleich zum Fernverkehr höheren Anzahl an Türöffnungen und einem damit einhergehenden Kühlleistungsbedarf auszugehen. Die Verbrauchsangaben decken sich grundsätzlich mit den Angaben zu maximalen Kraftstoffverbräuchen von Kühlaggregaten mittlerer Leistungsklasse, welche beispielsweise beim initialen Abkühlen des Kofferaufbaus mit maximaler Leistung nach Einschalten des Kühlaggregats auftreten und mit etwa 5 l/h beziffert werden [Dwy05], [Bar09b]. Nach Erreichen der Soll-Innentemperatur werden sich allerdings geringere mittlere Verbräuche pro Stunde einstellen, was zu den täglichen Verbräuchen nach Tabelle 2.2 führt.

Wie zu erkennen hat das Kühlaggregat einen erheblichen Anteil am Gesamtverbrauch. In der Fahrzeugklasse der Sattelzüge bewegt sich dieser zwischen ca. 15 % für schwere Fahrzeuge im Fernverkehrseinsatz und 24 % für Fahrzeuge im City- bzw. Verteilernetrieb. Eine rein elektrische Versorgung des Kühlaggregats auf Basis zurückgewonnener Bremsenergie bietet damit ein ebenfalls hohes Einsparpotential an Kraftstoff und Kraftstoffkosten.

2.2 Bremsenergierückgewinnung

Die Rückgewinnung und Nutzung ansonsten an die Umgebung abgegebener Energie stellt eine Möglichkeit zur Verringerung des Primärenergiebedarfs und damit zur Effizienzsteigerung eines Fahrzeugs dar. Das folgende Kapitel geht auf die Grundlagen der Rückgewinnung von Bremsenergie ein, die bei konventionellen Fahrzeugen in den Betriebs- oder Dauerbremsrichtungen in Wärme umgewandelt wird. Einleitend werden zunächst die am Sattelzug wirkenden Fahrwiderstände und die resultierenden Energiebilanzen betrachtet. Anschließend erfolgt im Zusammenhang mit der Energierückgewinnung eine Unterscheidung zwischen den Begriffen der Rekuperation mit und ohne Energiezwischen-speicherung, bevor abschließend auf technische Realisierungsbeispiele am Sattelaufzieger eingegangen wird.

2.2.1 Fahrwiderstände und Energiebilanz

Die Längsdynamik von Kraftfahrzeugen ist ausführlich in Standardwerken wie [Mit14] oder [App08] beschrieben. Deshalb beinhaltet dieses Kapitel nur eine zusammenfassende Darstellung. Am Fahrzeug und damit auch am Sattelzug wirken im Betrieb der Luftwiderstand F_L , der Rollwiderstand F_R , der Beschleunigungswiderstand F_B und der Steigungswiderstand F_{St} . Die Kräfte werden in der Zugkraft F_{Zug} zusammengefasst, die über die Summe der an den Rädern i des Fahrzeugs wirkenden aktiven Drehmomente $M_{R,i}$ mit dem jeweiligen dynamischen Rollradius $r_{R,i}$ aufzubringen ist.

$$F_{Zug} = \sum_1^i \frac{M_{R,i}}{r_{R,i}} = F_L + F_R + F_B + F_{St} \quad (2.1)$$

Der Luftwiderstand bezeichnet die Kraft, die auf einen von Luft umströmten Körper, in diesem Fall das Fahrzeug, wirkt. In die Berechnung der Kraft fließen der c_W -Wert, resultierend aus der Kontur des umströmten Körpers, die Stirnfläche A , die Luftdichte ρ_L und die Anströmgeschwindigkeit v_{an} ein. Bei angenommener Windstille entspricht die Anströmgeschwindigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Luftwiderstand wirkt der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs entgegen.

$$F_L = c_W A \frac{\rho_L}{2} v^2 \quad (2.2)$$

Der Rollwiderstand resultiert aus Verformungs- und Walkarbeit im Reifen und der dadurch nicht mittig im Reifenlatsch angreifenden Radaufstandskraft F_z . Ebenfalls ist die bleibende Verformung einer unbefestigten Fahrbahn inklusive der Reibung an der Reifenseitenwand dem Rollwiderstand zuzuschlagen. Der Rollwiderstand lässt sich je Rad i aus der jeweiligen Radaufstandskraft $F_{z,i}$ und dem Rollwiderstandsbeiwert $f_{R,i}$ des Reifens berechnen. Für das Gesamtfahrzeug ergibt sich der Rollwiderstand als Summe der Einzelwiderstände.

$$F_R = \sum_1^i F_{R,i} = \sum_1^i f_{R,i} F_{Z,i} \quad (2.3)$$

Die Radaufstandskräfte je Achse ergeben sich beim Sattelzug aus der Achslastverteilung, die wiederum aus den Massen, geometrischen Eigenschaften und Schwerpunktlagen der Zugmaschine, des Sattelauflegers und der Zuladung resultiert. Wie auch der Luftwiderstand wirkt der Rollwiderstand der Bewegung des Fahrzeugs immer entgegen.

Auf ein am Hang stehendes oder fahrendes Fahrzeug wirkt die Hangabtriebskraft, die parallel zur Fahrbahnoberfläche in Richtung des Tals wirkt. Diese Hangabtriebskraft führt zum sogenannten Steigungswiderstand F_{St} , der sich aus der Gesamtfahrzeugmasse m , der Erdbeschleunigung g und dem Sinus des Neigungswinkels der Fahrbahn α berechnet.

$$F_{St} = m g \sin \alpha \quad (2.4)$$

Die Gesamtfahrzeugmasse umfasst die Einzelmassen der Zugmaschine, des Sattelauflegers und der Zuladung. Entgegen zuvor genannter Fahrwiderstände wird der Steigungswiderstand bei Bergabfahrt negativ und wirkt in diesem Fall in Fahrtrichtung des Fahrzeugs.

Bei einer Änderung der Fahrgeschwindigkeit sind die am Fahrzeug wirkenden Trägheitskräfte zu überwinden. Der korrespondierende Fahrwiderstand wird als Beschleunigungswiderstand F_B bezeichnet. Die Berechnung erfolgt nach dem zweiten Newton'schen Axiom mittels der Gesamtfahrzeugmasse m und der Beschleunigung a . Gegenüber einem starren Körper sind am Fahrzeug auch rotatorische Massen, wie die Antriebs- und Getriebewellen sowie die drehenden Komponenten der Antriebsquelle, zu beschleunigen, wodurch sich der Beschleunigungswiderstand erhöht. Dieser Effekt wird vereinfachend durch den gangabhängigen Drehmassenzuschlagsfaktor λ berücksichtigt.

$$F_B = \lambda m a \quad (2.5)$$

Bei einem Beschleunigungsvorgang ($a > 0$) ist F_B positiv und wirkt der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs entgegen. Bei einer Verzögerung hingegen ($a < 0$) wirken die Trägheitskräfte in Fahrtrichtung.

Zusammen mit der Fahrgeschwindigkeit v ergibt sich aus der Zugkraft F_{Zug} die in Summe notwendige Leistung am Rad, die im Fahrbetrieb durch die Antriebs- und Verzögerungseinrichtungen des Fahrzeugs aufzubringen ist.

$$P_R = F_{Zug} v \quad (2.6)$$

Bei positiver Radleistung ist der Fall des Antreibens gegeben. Beim konventionellen Sattelzug wird diese Leistung unter Aufwendung von Kraftstoff über den Antriebsstrang der Zugmaschine bereitgestellt. Ist die Radleistung hingegen negativ, so wird das Fahrzeug über die Betriebs- oder Dauerbremsen der Zugmaschine und des Sattelauflegers gebremst. Bei einem Fahrzeug ohne Energierückgewinnungsmöglichkeit wird die in diesem Betriebszustand

freiwerdende Energiemenge vollständig dissipiert und in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Verfügt das Fahrzeug allerdings über ein entsprechendes System, so kann die Bremsenergie teilweise oder vollständig zurückgewonnen werden. Das Verhältnis der zurückgewonnenen zur gesamten Bremsenergie wird im Wesentlichen durch die Leistungsfähigkeit des Energierückgewinnungssystems im Zusammenspiel mit der fahrmanöverbasiert auftretenden Bremsleistung beeinflusst.

Eine Betrachtung der Energiebilanzen am Rad über eine vollständige Fahrt ermöglicht demnach eine Bewertung des theoretischen Potentials der Energierückgewinnung. LA CLAIRE definiert in diesem Zusammenhang gemäß vorheriger Unterscheidung die zum Antrieb aufzuwendende Traktionsenergie als das Integral über der Radleistung während der Zeitphasen t_{treib} mit positiver Radleistung bzw. Zugkraft [LaC12].

$$E_{trak,treib} = \int_{t_{treib}} P_R dt \quad (2.7)$$

Im Gegensatz dazu ergibt sich die beim Bremsen freiwerdende Traktionsenergie während der Zeitphasen t_{brems} mit negativer Radleistung bzw. Zugkraft.

$$E_{trak,brems} = \int_{t_{brems}} P_R dt \quad (2.8)$$

Die Summe aus aufzuwendender und freiwerdender Traktionsenergie ergibt die Gesamtenergiebilanz am Rad für die vollständige Fahrtdauer, wie auch WEILER ausführt [Wei14].

Weiterhin ist eine Unterscheidung nach konservativen bzw. reversiblen und dissipativen Energien möglich, wie sowohl von LA CLAIRE [LaC12] als auch von WEILER [Wei14] beschrieben. Zu den konservativen Energien zählen die potentielle und kinetische Energie. Die potentielle Energie ergibt sich in diesem Fall als Integral des Radleistungsanteils, der lediglich zur Überwindung des Steigungswiderstands erforderlich ist, im Folgenden als E_{St} bezeichnet. Analog dazu ergibt sich die kinetische Energie E_B als Integral des auf den Beschleunigungswiderstand zurückzuführenden Radleistungsanteils. Beiden konservativen Energien ist gemein, dass sie dem System erhalten bleiben und über einer vollständigen Fahrt bei gleichem Start- und Endzustand des Fahrzeugs, d.h. gleiche Geschwindigkeit und topographische Höhe zu Fahrtbeginn- und -ende, Null sind. Zu den dissipativen Energien gehören die auf den Luftwiderstand und den Rollwiderstand zurückgehenden Anteile des Integrals der Radleistung. Sowohl der Anteil des Rollwiderstands E_R als auch des Luftwiderstands E_L gehen dem System in Form eines Wärmeübergangs an die Umgebung verloren. Für die Gesamtbilanz der Traktionsenergie am Rad als Summe der konservativen und dissipativen Energien gilt somit folgenden Beziehung.

$$E_{trak} = E_{St} + E_B + E_R + E_L \quad (2.9)$$

Da anhand dieser Gesamtenergiebilanz keine Bestimmung der während einer Fahrt freiwerdenden Bremsenergie und damit des Potentials eines Energierückgewinnungssystems möglich ist, wird im Rahmen dieser Arbeit nur das Kriterium der negativen Radleistung zur Bestimmung der Bremsenergie $E_{trak,treib}$ bzw. der Zeitphasen des Bremsens herangezogen.

2.2.2 Zwischenspeicherung

Die Rückgewinnung und erneute Nutzung von Bremsenergie ist grundsätzlich mit oder ohne Zwischenspeicherung der Energie möglich. Die Variante ohne Zwischenspeicherung setzt voraus, dass die zurückgewonnene Energie an einer anderen Stelle im Antriebssystem ohne Zeitverzug und vollständig wiederverwendet werden kann. Die Zwischenspeicherung ermöglicht demgegenüber eine von der Rückgewinnung zeitlich unabhängige Wiederverwendung, bei der auch die Leistungsflüsse in den Phasen der Rückgewinnung und Wiederverwendung betragsmäßig entkoppelt sind.

Im Fall der Rückgewinnung von Bremsenergie am Kühlsattelaufleger zur Versorgung des Kühlaggregats kommt im Wesentlichen das Prinzip mit Zwischenspeicherung zum Tragen. Wie zuvor ausgeführt ergeben sich die Zeitphasen mit Energierückgewinnungspotential bei Fahrzuständen mit negativer Radleistung. Der Kühlleistungsbedarf und damit der Energieverbrauch des Kühlaggregats sind jedoch von einzelnen Fahr- und Bremsmanövern unabhängig. Damit erfolgen die Rückgewinnung und der Verbrauch nicht zwangsläufig zeitsynchron, eine Zwischenspeicherung ist erforderlich. Bei starken Bremsmanövern erfolgt die Energierückgewinnung zudem mit hoher Leistung in kurzen Zeitintervallen, während das Kühlaggregat eine im Vergleich zur Rückgewinnung geringe Antriebsleistung während einer längeren Zeitspanne benötigt. Auch dies erfordert einen Zwischenspeicher zur Entkopplung der Leistungsflüsse. Nur bei schwachen Bremsmanövern und gleichzeitigem Energiebedarf des Kühlaggregats kann der Fall der unverzüglichen und vollständigen Wiederverwendung der zurückgewonnenen Bremsenergie ohne Zwischenspeicherung theoretisch eintreten.

Häufig werden für den Begriff der Rückgewinnung von Energie die Begriffe *Rekuperation* oder *Regeneration* synonym verwendet. Beide stammen aus dem Lateinischen und bedeuten *wiedererlangen*, *wiedergewinnen* bzw. *wiedererzeugen*. STEINDORFF und THIEBES differenzieren zwischen beiden Begriffen anhand der Tatsache, ob die Rückgewinnung und Wiederverwendung der Energie mit oder ohne Zwischenspeicherung erfolgt. Die Wiederverwendung der zurückgewonnenen Energie ohne Zwischenspeicherung wird als *Regeneration* bezeichnet. Die *Rekuperation* charakterisiert demgegenüber den Fall der Rückgewinnung mit Zwischenspeicherung [Ste09], [Thi12].

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird vor den erläuterten Hintergründen von einem Systemaufbau mit Möglichkeit zur Energie-Zwischenspeicherung ausgegangen. Da beim gewählten Anwendungsbeispiel neben dem Fall mit Zwischenspeicherung zumindest theoretisch auch der Fall ohne Zwischenspeicherung eintreten kann, wird allgemein von Energierückgewinnung gesprochen.

2.2.3 Beispiele und Konzepte am Sattelaufleger

Die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Bremsenergie in Fahrzeugen gehört mittlerweile zum Stand der Technik. Entsprechende Systeme kommen sowohl in hybriden als auch rein elektrischen bzw. hydraulischen Antriebssträngen zum Einsatz. An dieser Stelle werden deshalb Lösungen und aktuelle Forschungsansätze am Sattelaufleger vorgestellt.

Als erstes Beispiel wird einleitend auf den Kühlsattelaufleger verwiesen, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Anwendungsbeispiel dient. Das Fahrzeug wurde als Versuchsträger im Rahmen eines bis Ende 2013 laufenden Gemeinschaftsforschungsprojekts aufgebaut und u.a. auf der IAA Nutzfahrzeuge 2012 der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Bremsenergie wird über zwei elektrische Generatorachsen zurückgewonnen, in einer Batterie zwischengespeichert und dem Kühlaggregat zur Verfügung gestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsträgers kann Kapitel 5.1 sowie [Dop13b] entnommen werden.

Einen grundsätzlich ähnlichen Ansatz verfolgt *Twan Heetkamp Trailers* mit einem Kühlsattelaufleger, der auf der IAA Nutzfahrzeuge 2014 gezeigt wurde. Das Fahrzeug nutzt ebenfalls zurückgewonnene Bremsenergie und eine Zwischenspeicherung dieser in einer Batterie zur elektrischen Versorgung des Kühlaggregats. Zusätzlich sind auf dem Dach des Fahrzeugs Solarzellen zur Unterstützung der elektrischen Versorgung verbaut. Das Fahrzeug nutzt zur Energierückgewinnung eine an der Achse befindliche hydrostatische Maschine. Mit dieser wird die Bremsenergie zunächst in einem Zwischenschritt in hydraulische Energie gewandelt, bevor in einem zweiten Schritt die Wandlung in elektrische Energie erfolgt. Die eingesetzte Achse stammt von der Firma Valx [THT15].

Als Alternative zur elektrischen Versorgung des Kühlaggregats am Sattelaufleger sei auf eine mögliche Anbindung an den elektrischen Teil des Antriebsstrangs einer hybriden Zugmaschine verwiesen. Entsprechende Konzepte wurden in [Che14] und [Rom14] vorgestellt und als Beispiel zur Entwicklung von Betriebsstrategien verwendet.

Eine rein elektrische Generatorachse wurde von Valx bereits auf der IAA Nutzfahrzeuge 2012 vorgestellt. Die *E2!* genannte Starrachse verfügt über einen achsmittig angeordneten permanent-erregten Synchrongenerator, der über ein Winkelgetriebe und eine Steckachse mit einem der beiden Räder der Achse verbunden ist. Die Nennleistung der Generatorachse beträgt 500 W bei einer Systemspannung von 24 V. Damit liegt der Einsatzzweck der Achse in der Nachladung konventioneller 24 V Bordbatterien von Sattelauflegern, wie sie beispielsweise zum Betrieb von Ladebordwänden benötigt werden [VAL13]. Die Generatorachse wirkt allerdings nicht nur beim Bremsen, sondern permanent bis zur vollständigen Ladung der Bordbatterie [TIN15]. Somit handelt es sich nur teilweise um eine Rückgewinnung von Bremsenergie. In den weitaus längeren Phasen mit positivem Zugkraftbedarf erzeugt die Achse einen zusätzlichen Fahrwiderstand und erhöht damit den Energie- und Kraftstoffverbrauch der Zugmaschine.

Die Firma BPW Bergische Achsen KG stellte im Jahr 2012 eine Generatorachse zur Bremsenergieerückgewinnung am Sattelaufleger mit höherer Leistung vor. Die Konzeptstudie *ECO*

Vision E basiert auf einer GFK-Achse und verfügt über zwei Radnabengeneratoren mit einer Leistung von je 5 kW. Die in Bremsphasen zurückgewonnene Energie wird in einer Batterie mit einer nutzbaren Kapazität von 2 kWh bei einer Systemspannung von 110 VDC zwischengespeichert und zur Versorgung von Energieverbrauchern am Trailer verwendet. Als Beispiele werden ein elektrisch betriebener Kompressor zur Druckluftversorgung des Bremssystems und der Federung, die zugehörige Regelung und Steuerung oder die Lichtanlage genannt [Ros13]. Auch die Bereitstellung überschüssiger Energie für Kühlaggregate wird thematisiert [BPW12]. Die Dimensionierung des Systems, die Entwicklung von Einschaltstrategien für die Generatoren und die Potentialbestimmung führten RAAZ et al. durch. Die Arbeiten basieren auf Simulationen, welche direkt auf Messdaten für die Geschwindigkeit sowie Brems-, Gaspedal- und Retardersignale zurückgreifen. Auf Grundlage der genannten Systemspezifikation und einer optimierten Einschaltstrategie wird exemplarisch für die Testrunde der Fachzeitschrift VerkehrsRUNDschau (vgl. auch Kapitel 2.4) die zurückgewinnbare Bremsenergie mit 9,2 kWh beziffert [Raa13]. Bei einer Länge der Testrunde von etwa 350 km führt dies zu einer normierten zurückgewonnenen Energiemenge von ca. 2,6 kWh pro 100km. Aufbauend auf der beschriebenen Lösung wurde 2016 unter dem Namen *ePower* ein Radnabengenerator insbesondere zum Einsatz in Kühlsattelauflegern präsentiert [BPW16].

Als weiteres aktuelles Beispiel ist das von der Europäischen Union geförderte Projekt „Configurable and Adaptable Trucks and Trailers for Optimal Transport Efficiency“ (Akronym: Transformers). In dessen 42-monatiger Laufzeit vom 01.09.2013 bis zum 28.02.2017 werden u.a. ein Demonstrator und Framework eines verteilten „Hybrid-on-Demand“-Antriebsstrangs entwickelt [Elm14b]. Die grundsätzliche Idee besteht darin, den Anhänger einer Fahrzeugkombination mit einem elektrischen Antriebsstrang - bestehend aus einer elektrischen Motor-Generator-Achse, Batterien und der notwendigen Steuerungstechnik - auszurüsten. In Bremsphasen wirkt die elektrische Maschine als Generator und die zurückgewonnene Energie wird in der Batterie zwischengespeichert. Zur Antriebsunterstützung der Zugmaschine wirkt die elektrische Maschine am Trailer aktiv als Motor unter Energieentnahme aus der Batterie. Im Zusammenspiel mit einer konventionellen Zugmaschine entsteht auf diese Weise ein über das Gespann verteilter Hybridantrieb. Der Verbrennungsmotor befindet sich auf der Zugmaschine und die elektrische Antriebstechnik ist vollständig auf dem Anhänger untergebracht [Elm14a]. Im Gegensatz zu den vorab vorgestellten Ansätzen und Lösungen wird die am Anhänger zurückgewonnene Energie im Wesentlichen für den Fahrantrieb und nicht nur zur Versorgung von Nebenverbrauchern verwendet. Dieses grundsätzliche Konzept eines verteilten Hybridantriebs mit angetriebenem Sattelaufleger ohne Eingriff in den Antriebsstrang der konventionellen Zugmaschine wurde bereits durch [Sur10] in Simulationen hinsichtlich erreichbarer Verbesserungen im Kraftstoffverbrauch, der Traktion und der Fahrstabilität untersucht. Neben den erreichbaren Kraftstoff- und Energieeinsparungen wird aufgrund der verbesserten Traktion das Potential insbesondere im Off-Highway Transport mit schweren Nutzfahrzeugen gesehen. Anstatt der Verwendung eines elektrischen Antriebssystems am Sattelaufleger wird in [Mid11] und [Mid13]

die Verwendung hydrostatischer Maschinen und Hydrospeicher zur Bremsenergieerückgewinnung, Zwischenspeicherung und Antriebsunterstützung vorgeschlagen. Das grundsätzliche Konzept der Ausrüstung des Sattelauflegers im Zusammenspiel mit einer konventionellen Zugmaschine ist jedoch analog der vorherigen Beispiele zu sehen, lediglich die eingesetzte Technologie ist unterschiedlich. Die Verwendung hydrostatischer Komponenten zur Bremsenergieerückgewinnung wird aufgrund der erreichbaren Leistungsdichte in Kombination mit Kosten- und Bauraumaspekten favorisiert [Mid12].

Ein weitergehendes Konzept für elektrische verteilte Fahrtriebe wird in Simulationen durch [Dib13] betrachtet. Im Unterschied zu den zuvor beschriebenen Konzepten ist neben einem Sattelaufleger mit elektrischer Antriebstechnik zusätzlich eine hybridisierte Zugmaschine mit parallel-elektrischem Antriebsstrang in das System einbezogen. Auf dem Gespann befindet sich eine Batterie zur Energiezwischenspeicherung. Über eine Leistungsschnittstelle sind die elektrischen Antriebssysteme beider Fahrzeugteile miteinander verbunden, sodass die Möglichkeit des bidirektionalen Energieaustauschs besteht. Sowohl am Sattelaufleger als auch an der Zugmaschine besteht die Möglichkeit zur Bremsenergieerückgewinnung. Der Antriebsstrang kann grundsätzlich als Kombination eines parallelen Hybridantriebs an der Zugmaschine und eines seriellen Hybridantriebs am Sattelaufleger verstanden werden.

Allen genannten Beispielen zur Energieerückgewinnung am Sattelaufleger oder Anhänger ist gemein, dass sie zum Zeitpunkt dieser Arbeit weit von einem flächendeckenden Einsatz entfernt sind. Erreichbare Energie- oder Kraftstoffeinsparungen hängen stark vom Einsatzprofil des Fahrzeugs ab und sind einem erhöhten Leergewicht und dem damit einhergehenden erhöhten Bedarf an Traktionsenergie am Rad des Zugfahrzeugs gegenüberzustellen. Aufgrund der gesetzlich festgelegten zulässigen Gesamtmassen vermindert sich zudem durch die höhere Leermasse die mögliche Zuladung. An dieser Stelle sei jedoch auf eine Initiative der EU zur Anhebung der zulässigen Gesamtmasse um bis zu eine Tonne verwiesen, sofern das Fahrzeug über einen alternativen Antrieb, wie bspw. einen Elektro- oder Hybridantrieb, verfügt [Lei14]. Auch die Anschaffungskosten für entsprechend ausgerüstete Fahrzeuge fallen bei einem zusätzlich komplexeren Systemaufbau im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug höher aus. Eine anwendergerechte Auslegung oder Konfiguration entsprechender Systeme und Fahrzeuge und die damit einhergehende Bestimmung des Einsparpotentials erfordert somit eine einsatzindividuelle Betrachtung.

2.3 Energetisch-orientierte Bewertungsansätze

Die Bewertung von Fahrzeugen erfordert neben der Definition anzuwendender Kriterien eine formale Beschreibung des Fahrzeugeinsatzes, für welchen die Bewertung zu erfolgen hat. Zur Generierung aussagekräftiger Ergebnisse spiegelt diese Beschreibung den realen und typischen Fahrzeugeinsatz beim Anwender idealerweise exakt wieder. Das Wissen über den Einsatz des Fahrzeugs und die darauf basierende Beschreibung dessen bilden somit die Grundlage der Bewertung. Zur Beschreibung des Fahrzeugeinsatzes werden in der Regel Fahr- bzw. Lastzyklen

verwendet. Im Folgenden werden mögliche Bewertungskriterien und grundsätzliche Realisierungsformen von Fahr- und Lastzyklen vorgestellt und diskutiert.

2.3.1 Anwendbare Kriterien

Zur energetisch-orientierten Bewertung von Nutzfahrzeugen und deren Antriebssträngen können verschiedene Kriterien herangezogen werden. Im weiteren Verlauf wird auf eine Auswahl näher eingegangen. Ergänzende Ausführungen sind beispielsweise [Dei09], [Bau14], [Fle13] oder [Liel4] zu entnehmen. Darüber hinausgehende Bewertungskriterien beziehen sich z. B. auf die Robustheit, Wartungsfreundlichkeit, Einsatzflexibilität und Kosten im Einsatz. Insbesondere die Betriebskosten, in denen die mit dem Kraftstoffverbrauch einhergehenden Kosten enthalten sind, spielen aufgrund des Kostendrucks in der Transportbranche eine zentrale Rolle [Wit11]. Als vergleichende Bewertungskriterien ungeeignet sind dagegen alle einzuhaltenden gesetzlichen Vorgaben für die Zulassung und den Betrieb der Fahrzeuge (vgl. [FZV11] und [SVZ12]).

Kriterien für eine energetisch-orientierte Bewertung sind der absolute Energiebedarf am Rad und der Kraftstoffverbrauch, die aus der Verrichtung einer Fahr- oder Arbeitsaufgabe resultieren. Die Angabe erfolgt in der Regel in der Einheit kWh oder Litern. In den zum Antrieb erforderlichen Energiebedarf am Rad gehen nach Kapitel 2.2.1 die Fahrwiderstände in den Zeitphasen des aktiven Antreibens ein. Am Kraftstoffverbrauch beteiligt ist darüber hinaus der mit Energieverlusten behaftete Antriebsstrang aus Kennungswandler (Getriebe), primärer Antriebsquelle - im Nutzfahrzeug in der Regel ein Dieselmotor - und Nebenverbrauchern.

Der Wirkungsgrad ist definiert als zeit- und damit betriebspunktbezogenes Verhältnis der nutzbaren Ausgangsleistung zur Eingangsleistung eines Antriebsstrangs oder einer einzelnen Komponente [Dei09] [Fle13]. Die Differenz beider Leistungen ist die Verlustleistung. Sie geht in Form von Wärme verloren. Mit dem Wirkungsgrad ist allerdings keine Aussage zur gesamten zeitspannen-bezogenen Aufgabe über einen vollständigen Zyklus möglich. Nach DEITERS wird der Wirkungsgrad nach genannter Definition auch als aktueller Wirkungsgrad bezeichnet. Demgegenüber ist der mittlere Wirkungsgrad als Verhältnis der während einer Zeitspanne genutzten Energie zur zugeführten Energie definiert [Dei09] [Lis06]. Am Beispiel des Fahrens von Nutzfahrzeugen entspricht dies dem Verhältnis der zum Antrieb aufgewendeten Traktionsenergie am Rad zur abgegebenen mechanischen Energie des Dieselmotors (Systemgrenze Getriebe) oder zur über den Kraftstoff zugeführten Energie (Systemgrenze gesamter Antriebsstrang). In Abgrenzung zum zeitpunktbezogenen aktuellen Wirkungsgrad wird der mittlere Wirkungsgrad auch als Energienutzungsgrad bezeichnet [Hel07] [Fle13]. Zum Vergleich von Fahrzeugen oder Antriebssträngen anhand des aktuellen oder mittleren Wirkungsgrads ist eine konstante Bezugsgröße, in der Regel die Ausgangsleistung oder die nutzbare Arbeit, festzulegen.

Die Fahrzeug-Energieeffizienzkennzahl nach [Arn07] beschreibt am Beispiel Pkw das Verhältnis aus dem Zuladungsenergiebedarf, der zur Beschleunigung einer definierten Zuladung aufzuwenden ist, und dem Gesamtfahrzeugenergiebedarf, welcher neben der Zuladung auch das Eigengewicht des Fahrzeugs sowie alle wirkenden Fahrwiderstände mit einschließt. Die Energiemengen berechnen sich über eine definierte Zeitspanne am Rad, womit der Antriebsstrang ausgeklammert ist. FLECZORECK schlägt mit dem Ziel einer konsequenteren Definition eine Modifikation der Fahrzeug-Energieeffizienzkennzahl vor, indem er im Zuladungsenergiebedarf auch diejenigen Anteile im Roll- und Steigungswiderstand berücksichtigt, deren Ursache die Zuladung ist. Zur Bewertung technischer Maßnahmen und ihres jeweiligen Einflusses auf den Kraftstoffverbrauch können wie durch ROHDE-BRANDENBURGER ausgeführt sogenannte Verbrauchskennzahlen oder auch *Fuel Reduction Values* herangezogen werden [Lie14]. Mit diesen lassen sich beispielsweise erreichbare Kraftstoffeinsparungen bezogen auf eine Gewichtseinsparung oder eine Verbesserung in der Aerodynamik darstellen und für einen Fahrzyklus vergleichen.

„Effizienz“ bezeichnet allgemein das Verhältnis eines Zielertrags zu den zur Zielerreichung erforderlichen Mitteln [Can07]. Diese Definition wurde durch DEITERS auf mobile Arbeitsmaschinen übertragen, bei denen die Effizienz definiert ist als *„die Menge an verbrauchtem Kraftstoff für die Erfüllung einer bestimmten Arbeitsaufgabe“* [Dei09]. Eine analoge Übertragung ist auch für das Nutzfahrzeug möglich, wobei die Arbeitsaufgabe der Transport einer bestimmten Zuladung über eine festgelegte Distanz ist. Das Produkt aus transportierter Zuladung und zurückgelegter Distanz wird in der Regel als Transport- oder Verkehrsleistung bezeichnet [Sta07]. Die Definition der Effizienz für diesen spezifischen Fall ist demnach *„Transportleistung in Tonnen-Kilometer pro verbrauchtem Liter Kraftstoff“*. Im europäischen Raum wird häufig der reziproke Wert der Effizienz in der Einheit *„Liter pro Tonnen-Kilometer“* oder auch nur in *„Liter pro Kilometer“* angegeben.

Nach [Web09] und [Zwa06] wird das Verhältnis aus Ausbringungsmenge zu Faktoreinsatzmenge, bzw. vom mengenmäßigen Produktionsergebnis zur Menge der eingesetzten Produktionsfaktoren, als Produktivität bezeichnet. Damit erfolgt keine eindeutige Abgrenzung zur Effizienz. Gemäß [Dei09] und [Bau14] soll jedoch in Abgrenzung zur Effizienz die folgende Definition der Produktivität verwendet werden. Die Produktivität wird definiert als das Verhältnis aus produzierter Menge bzw. transportiertem Gut zur dafür benötigten Zeit. Kann exemplarisch mit einem Fahrzeug eine fest definierte Transportaufgabe schneller abgeschlossen werden als mit einem anderen, ist die Produktivität des ersten Fahrzeugs besser zu bewerten. Der Mitteleinsatz in Form von Kraftstoff geht in die Produktivität nicht ein und ist über die zuvor beschriebenen Kriterien zu berücksichtigen.

2.3.2 Beschreibungsformen des Fahrzeugeinsatzes

Als Grundlage einer Bewertung ist neben den anzuwendenden Kriterien der Fahrzeugeinsatz zu definieren und geeignet zu beschreiben, für den die Bewertung zu erfolgen hat. Hinsichtlich

der Beschreibungsform existieren verschiedene grundsätzliche Ansätze und Möglichkeiten, von denen nachfolgend eine Auswahl vorgestellt wird. Auf konkrete Umsetzungsbeispiele gehen Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5 ein. Unabhängig von der Beschreibungsform basieren die Ansätze entweder auf gemessenen oder auf synthetisch erzeugten Daten.

Für im Wesentlichen stationär arbeitende Fahrzeuge oder Maschinen kann der Einsatz mittels einer begrenzten Anzahl statischer Betriebszustände beschrieben werden. Ist jedem Betriebszustand und Abtrieb eine Ausgangsleistung zugeordnet, sind damit in Abhängigkeit der Antriebsstrangparameter die korrespondierende Eingangsleistung und der aktuelle Wirkungsgrad berechenbar. Bei zusätzlicher Zuordnung eines Zeitanteils oder einer Zeitdauer je Betriebszustand lassen sich auch der mittlere Wirkungsgrad oder die Effizienz für den beschriebenen Einsatz bestimmen. Dynamische Vorgänge lassen sich mit dieser Methode nicht berücksichtigen und abbilden.

Als weitere Beschreibungsmöglichkeit können Bewegungs- oder Leistungsvorgaben über der Zeit definiert sein. Eine mögliche Bewegungsvorgabe ist beispielsweise die durch ein Fahrzeug zu fahrende Sollgeschwindigkeit. Die Last am Antrieb stellt sich in diesem Fall entsprechend der jeweiligen Fahrzeugparameter und weiterer lastbeeinflussender Größen, wie beispielsweise der Zuladung oder Fahrbahnsteigung, ein. Eine Leistungsvorgabe erfordert demgegenüber neben der Bewegungsvorgabe die direkte Vorgabe der Last, sodass Geschwindigkeit und Kraft bzw. Drehzahl und Drehmoment in Kombination vorgegeben werden. Entsprechende Darstellungen werden in der Regel als Fahr-, Last- oder Leistungszyklus bezeichnet [Bau14]. Diese bieten die Möglichkeit zur Berücksichtigung dynamischer Vorgänge im Fahrzeugeinsatz. Nachteilig ist das lediglich zeitbasierte Aufprägen der lastbeeinflussenden Größen ohne Einbeziehung des aktuellen Systemzustands. Dies kann zur Über- oder Unterforderung eines Fahrzeugs oder Antriebsstrangs führen. Übersteigt beispielsweise die durch den Zyklus vorgegebene oder zum Nachfahren des Zyklus erforderliche Leistung die Maximalleistung des betrachteten Fahrzeugs, so führt diese Untermotorisierung zu einer bleibenden Regelabweichung zwischen der Sollgröße des Zyklus und der sich einstellenden Größe am Fahrzeug. Bei einer zeitbasierten Vorgabe der Sollgeschwindigkeit besteht in diesem Fall zum Zyklusende eine Abweichung zwischen dem Soll- und dem tatsächlich zurückgelegtem Ist-Weg (vgl. Bild 2.3 oben). Die auf dieser Grundlage ermittelten Bewertungskriterien sind damit nicht aussagekräftig. Nach THIEBES kann durch eine geeignete Wahl der Reglerstruktur ein entsprechender Fehler ausgeglichen werden, indem die Geschwindigkeit in den auf eine Untermotorisierung folgenden Phasen gegenüber der Sollvorgabe des Zyklus erhöht wird [Thi11]. Durch dieses Vorgehen werden allerdings die zeitpunktbezogenen Betriebszustände gegenüber dem Zyklus aktiv verändert und eine direkte Vergleichbarkeit ist ebenfalls nicht mehr gegeben. Verfügt das Fahrzeug über eine Maximalleistung oberhalb der zum Abfahren des Zyklus erforderlichen Leistung, wird es den Zyklus in vorgegebener Zeit befahren können. Allerdings wird es keinem Zeitpunkt an der Leistungsgrenze betrieben. Die Ermittlung und Bewertung einer Produktivitätssteigerung durch ein

schnelleres Erreichen des Zyklusendes ist auf Grundlage eines zeitbasierten Zyklus nicht möglich.

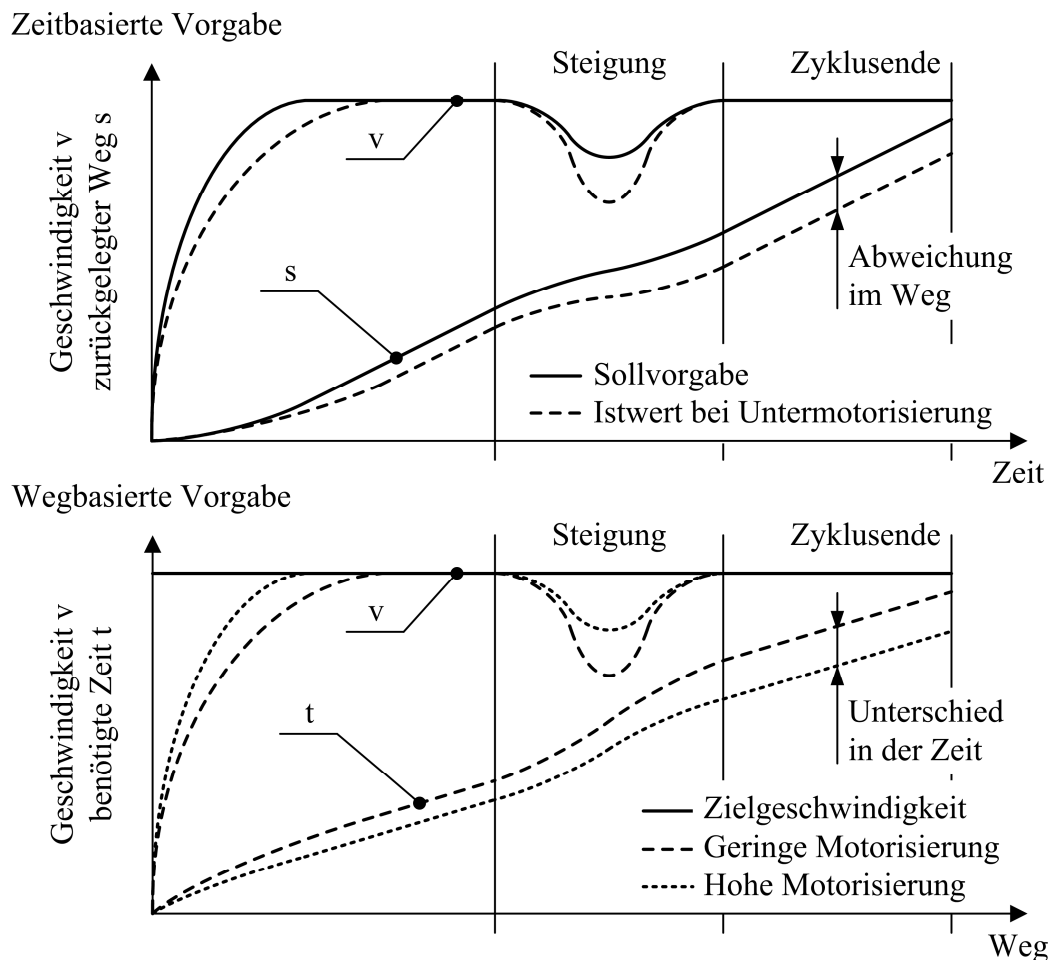


Bild 2.3: Zeit- und wegbasierte Vorgabe einer Fahrgeschwindigkeit mit jeweiliger Auswirkung unterschiedlicher Motorisierungen auf den zurückgelegten Weg bzw. die benötigte Zeit bei Beschleunigungsmanövern und an Steigungen

Alternativ können lastbeeinflussende Größen, etwa eine zu fahrende Sollgeschwindigkeit oder die Fahrbahnsteigung, in Abhängigkeit des zurückgelegten Wegs vorgegeben werden. Die wegbasierte Vorgabe einer Sollgeschwindigkeit wird dabei als Zielgeschwindigkeitsansatz bezeichnet. Tritt bei wegbasierter Geschwindigkeitsvorgabe beim Befahren einer Steigung der Fall der Untermotorisierung ein, wird das jeweilige Fahrzeug die Steigung mit der maximal möglichen Geschwindigkeit unterhalb der Sollgeschwindigkeit befahren. Die maximal mögliche Geschwindigkeit kann sich dabei frei in Abhängigkeit der Fahrzeugeigenschaften einstellen. Dadurch beansprucht das Fahrmanöver mehr Zeit, aufgrund der wegbasierten Vorgabe wird der Zyklus aber dennoch vollständig befahren. Stärker motorisierte Fahrzeuge können demgegenüber die Steigung mit höherer Geschwindigkeit befahren und zudem bei Beschleunigungsvorgängen die Sollgeschwindigkeit schneller erreichen. Der Zyklus wird in diesem Fall in geringerer Zeit befahren (vgl. Bild 2.3 unten). Im Gegensatz zur zeitbasierten Vorgabe ist die Zyklusdauer nicht definiert und damit die Produktivität bewertbar. Zur Vorgabe der Sollgrößen

wird ein jeweils aktueller Systemzustand, in diesem Fall der tatsächlich zurückgelegte Weg, herangezogen. Damit adaptiert sich die Vorgabe bzw. der Zyklus automatisch an das betrachtete Fahrzeug oder System. Nachteilig an der rein wegbasierten Vorgabe ist die nicht mögliche Abbildbarkeit von Vorgängen an gleicher Position bzw. bei Fahrgeschwindigkeit Null.

Als weitere Möglichkeit besteht die verbale Beschreibung von Fahraufgaben oder umzusetzenden Arbeitsspielen unter definierten Randbedingungen. Im Nutzfahrzeugbereich können hierzu Fähranweisungen oder Routeninformationen gezählt werden, die zum Abfahren definierter Testrunden auf öffentlichen Straßen benötigt werden. Beispiele sind die Testrunden gängiger Fachzeitschriften, welche für den objektiven Vergleich verschiedener Fahrzeugmodelle herangezogen werden (vgl. [Zei10] oder [Grü12]). Anschauliche Beispiele für die verbale Beschreibung umzusetzender Arbeitsspiele aus dem Bereich der mobilen Maschinen sind das Entladen eines Lastkraftwagens mit einem Gegengewichtsstapler in möglichst kurzer Zeit (Linde Gabelstapler-Leistungstest [LMH09]) oder das Umsetzen eines Schüttguthaufens mit einem Radlader von einem Ort zu einem anderen im sogenannten Liebherr Normtest [LWB15]. Der grundsätzliche Ansatz kann Parallelen zur zeit- und wegbasierten Vorgabe von Sollgrößen aufweisen, indem beispielsweise die Zeit für das Arbeitsspiel oder der Ort eines Fahrmanövers festgelegt wird. Der Verbrauch und/oder die Produktivität hängen bei diesem Ansatz stark von der Erfahrung und dem Können des Fahrers bzw. Bedieners ab. Erfolgt die Bewertung simulationsgestützt, erfordert dies eine hinreichend genaue Modellierung des Bedienerverhaltens im Zusammenspiel mit der Maschinenumgebung [Bau14].

Als letzte Möglichkeit sei auf die statistik-basierte Beschreibung des Fahrzeugeinsatzes verwiesen. Fahrerhandlungen, die bspw. zur Belastung eines Antriebsstrangs führen, lassen sich statistisch beschreiben und in geeigneten Datensätzen ablegen. Eine entsprechende Statistik kann beispielsweise Informationen zur Abfolge von Zielgeschwindigkeiten oder Fahrerhandlungen enthalten, die vom Fahrer ausgehend von der aktuellen Fahrsituation und der Fahrumgebung gewählt werden. Im Zusammenspiel mit einem geeigneten Fahrermodell sind diese Informationen zur Wiedergabe der statistisch beschriebenen Handlungen nutzbar [Mül02], [Wei14], [Bau14]. Ein Fahrzyklus im Sinne einer zeit- oder wegbasierten Geschwindigkeitsvorgabe existiert bei dieser Variante nicht, das gefahrene bzw. simulierte Geschwindigkeitsprofil stellt sich erst im Zusammenspiel von Fahrzeug, Fahrumgebung und Fahrermodell bzw. Statistik ein.

2.3.3 Methoden zur Ergebniserzeugung

Es existieren verschiedene Methoden zur Ermittlung der Bewertungsergebnisse auf Grundlage des beschriebenen Einsatzes. Die Methoden reichen von der Simulation über Prüfstandmessungen mit einzelnen Baugruppen oder dem gesamten Fahrzeug bis hin zu Messungen im realen Einsatz. Welche der möglichen Kombinationen aus Bewertungskriterium, Einsatzbeschreibung und Methode zum Einsatz kommt, hängt wie auch von BAUMGARTEN beschrieben u.a. vom Entwicklungsstand des Fahrzeugs, der Art der Arbeitsaufgabe und dem Einfluss des Bedieners

bzw. Fahrers ab [Bau14]. Bei stationär arbeitenden Fahrzeugen oder mobilen Arbeitsmaschinen, zu denen als Beispiel der Mähdrescher im Ernteeinsatz zählt, ist eine Einsatzbeschreibung mittels statischer Betriebspunkte und den jeweiligen Zeitpunkten für eine Effizienzbewertung ausreichend [Fle13]. Die Prozess- und Umgebungsparameter ändern sich nur sehr langsam und der Bediener hat im Wesentlichen eine passiv-überwachende Funktion [Bau14]. Bei dynamisch arbeitenden Fahrzeugen oder Maschinen, zu denen Nutzfahrzeuge gezählt werden, reichen statische Betriebspunkte zur Beschreibung des Fahrzeugeinsatzes nicht mehr aus. Stattdessen sind zeit-, weg- oder statistikbasierte Ansätze sowie geeignet formulierte Fahraufgaben anzuwenden. Der Einfluss des Fahrers nimmt mit steigender Dynamik des Fahrzeugbetriebs zu. Insbesondere bei hochdynamischen Fahr- und Arbeitsvorgängen ist das Fahrer- und Bedienerverhalten explizit zu berücksichtigen, da es einen signifikanten Einfluss auf die Effizienz und Produktivität hat [Bau14]. Hier sei auf die Arbeiten von BAUMGARTEN am Beispiel des Verladebetriebs von Schüttgut mit mobilen Maschinen im sogenannten Y-Zyklus verwiesen.

Die Methode der simulationsgestützten Bewertung bietet sich gegenüber der Verwendung realer Komponenten, Baugruppen oder Fahrzeuge insbesondere in den frühen Entwurfsphasen eines Fahrzeugs oder einer Maschine an [VDI33], [Ber05]. Häufig kann mit einfachen Simulationsmodellen und Einsatzbeschreibungen begonnen werden, die mit fortschreitendem Entwicklungsprozess und wachsendem Wissen über die Beschaffenheit und Eigenschaften des Fahrzeugs weiter detailliert werden. In einem möglichen ersten Schritt können Fahrzeuge und/oder deren Antriebsstränge mittels statischer Modelle beschrieben und anhand ausgewählter Betriebspunkte verglichen werden [Koh08] [Fle13]. Zur Einbeziehung der Dynamik in die Simulation bieten sich zeitbasierte Fahr- oder Leistungszyklen an. Bei Vorgabe der Abtriebsleistung durch den Zyklus handelt es sich um eine rückwärtsgerichtete oder inverse Simulation [Bau14]. Ausgehend von den abtriebsseitigen Bewegungs- und Lastvorgaben kann für alle an der Leistungsübertragung beteiligten Elemente auf die erforderliche Leistung und die Betriebspunkte am Antrieb und damit den Kraftstoff- oder Energieverbrauch geschlossen werden. Bei Abbildung wirkungsgradbehafteter Elemente im Simulationsmodell ist eine Nachführung der Größen am Antrieb zur Regelung und Einhaltung der Abtriebsleistung erforderlich. Demgegenüber basiert die vorwärtsgerichtete Simulation lediglich auf der Vorgabe einer Bewegung am Abtrieb bzw. einer Fahrgeschwindigkeit über der Zeit oder dem Weg. Neben dem Simulationsmodell des Antriebsstrangs wird in diesem Fall ein Modell des Fahrzeugs benötigt, mittels dessen sich die Lastgrößen in Abhängigkeit der Fahrzeugparameter und des aktuellen Fahrzustands in der Simulation berechnen lassen. Für Längsdynamiksimulationen sind hierzu die Beziehungen zur Fahrwiderstandsberechnung nach Kapitel 2.2.1 anwendbar. Die Bewegungsvorgabe muss durch einen entsprechenden Regler bzw. ein geeignetes Fahrermodell umgesetzt werden.

Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen der Fahrumgebung, dem Fahrzeug und dem Fahrer handelt es sich um eine Gesamtsimulation. Diese kommt dem realen System aus Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung am nächsten, erfordert jedoch den höchsten Modellierungsaufwand. Insbesondere dem Fahrer- oder Bedienermodell kommt eine besondere

Bedeutung zu, da es analog eines menschlichen Bedieners die Effizienz- und Produktivität wesentlich beeinflusst [Bau14].

Im Anschluss an diese grundsätzliche Beschreibung möglicher Bewertungskriterien, Methoden und Einsatzbeschreibungen werden im weiteren Verlauf konkrete Beispiele standardisierter Fahr- und Lastzyklen sowie Methoden zur Erzeugung von Fahrzyklen vorgestellt. Bei der Erzeugung von Fahrzyklen wird insbesondere auf Ansätze eingegangen, die explizit eine Variabilität der Fahrzyklen hinsichtlich des anwenderspezifischen Einsatzprofils aufweisen. Der Fokus liegt auf dem Bereich der schweren Nutzfahrzeuge, allerdings sind auch Ansätze aus verwandten Bereichen aufgeführt.

2.4 Standardisierte Einsatzbeschreibungen

Standardisierte Fahrzyklen werden zur legislativen Emissions- und Verbrauchsbestimmung von Personenkraftwagen, Motorräder und Nutzfahrzeugen einschließlich Bussen verwendet. Allgemein bekannte Beispiele aus dem Pkw-Bereich sind der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ), der FTP-75 aus den USA oder der japanische JC08-Zyklus. Für Stadtbusse wurde beispielsweise der sogenannte Braunschweig-Zyklus entwickelt [Dre75]. Eine gute Übersicht über standardisierte Fahrzyklen geben BARLOW et. al. [Bar09a]. Im Folgenden werden in den jeweiligen Branchen allgemein anerkannte Einsatzbeschreibungen in Form von Fahr- und Leistungszyklen vorgestellt. Den beschriebenen Fahrzyklen ist gemein, dass sie eine Geschwindigkeitsvorgabe über der Zeit enthalten. Damit besteht gemäß vorheriger Ausführungen keine Adaptierbarkeit der Fahrzyklen an die Parameter des Fahrzeugs und die beschriebenen Effekten der Unter- bzw. Übermotorisierung können auftreten.

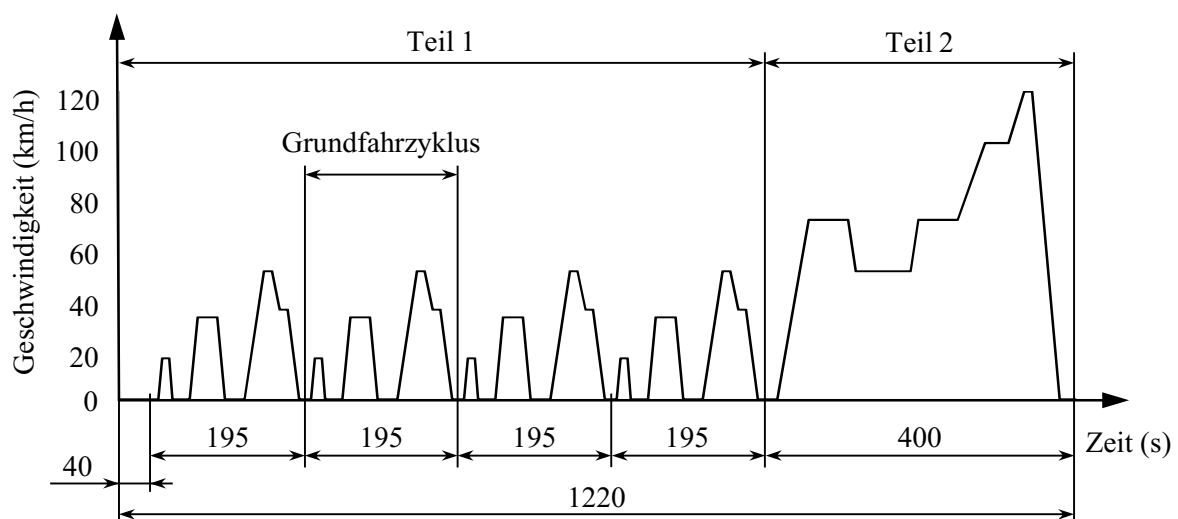


Bild 2.4: Neuer Europäischer Fahrzyklus nach [EWG91]

In der Europäischen Union wird zurzeit der NEFZ zur legislativen Verbrauchs- und Emissionsbestimmung von Kraftfahrzeugen der Klasse M1 (vgl. Fahrzeugklassen nach [EGR93], [EGR07]) verwendet [EGR93]. Der gesamte Fahrzyklus besteht aus einem Stadtfahrzyklus (Teil 1) und einem außerstädtischen Fahrzyklus (Teil 2). Der Stadtfahrzyklus selbst setzt sich

aus 4 aufeinanderfolgenden Grundfahrzyklen zusammen [EWG91]. Wie Bild 2.4 zu entnehmen ist, handelt es sich um eine synthetische Geschwindigkeitsvorgabe über Zeit in Form von Trapezen. Der Fahrzyklus weist damit Phasen konstanter Beschleunigung und Verzögerung, konstanter Geschwindigkeit und Stillstandphasen auf.

Der NEFZ soll im Jahr 2017 durch die Fahrzyklen der Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) ersetzt werden, die durch die Vereinten Nationen erarbeitet werden [GRP15]. Insgesamt umfasst die WLTP drei Fahrzyklen, die sich jeweils aus verschiedenen aufeinander folgenden Phasen zusammensetzen. Der für ein Fahrzeug gültige Fahrzyklus ergibt sich anhand des „rated power to unladen mass ratio“ P_{mr} und der Maximalgeschwindigkeit v_{max} des Fahrzeugs. Es wird zwischen den drei Fahrzeugkategorien Class 1 ($P_{mr} \leq 22$ W/kg), Class 2 (22 W/kg $< P_{mr} \leq 34$ W/kg) und Class 3 ($P_{mr} > 34$ W/kg) differenziert. Ausgehend von der Maximalgeschwindigkeit des aktuell betrachteten Fahrzeugs ist zur Gewährleistung der Fahrbarkeit eine Abwärts-Skalierung der Geschwindigkeitsverläufe vorgesehen [ECE13].

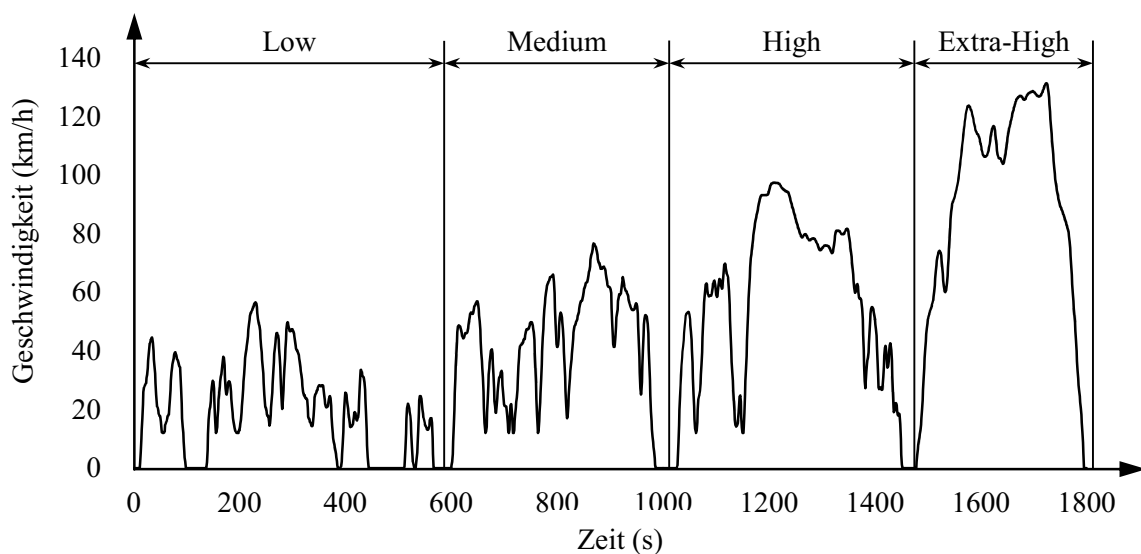


Bild 2.5: WLTP-Zyklus für Class 3 Fahrzeuge mit $v_{max} \geq 120$ km/h nach [ECE13]

Bild 2.5 zeigt exemplarisch den WLTP-Zyklus für Class 3 Fahrzeuge mit einer Maximalgeschwindigkeit größer 120 km/h. Der Zyklus beinhaltet die vier Phasen Low, Medium, High und Extra-High, die sich als typische Stadt-, Land- und Autobahn- bzw. schnelle Autobahnfahrt interpretieren lassen. Im Gegensatz zum NEFZ basieren die WLTP-Zyklen auf gemessenen Geschwindigkeitsprofilen, die ebenfalls über der Zeit vorgegeben werden. Im Vergleich zum NEFZ ist eine gewisse Adaptierbarkeit an Fahrzeugparameter bzw. die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeugs über die Klassierung und Skalierung der Zyklen gegeben.

Ein Beispiel für einen auf Messdaten basierenden Fahrzyklus aus dem Bereich der schweren Nutzfahrzeuge ist der FIGE-Zyklus (vgl. Bild 2.6). Der FIGE-Zyklus ist nicht standardisiert,

bildet jedoch die Grundlagen für den European Transient Cycle (ETC). Dieser wird in der Europäischen Union zusammen mit dem European Stationary Cycle (ESC) und dem European Load Response Test (ELR) zur Typgenehmigung und Emissionsbestimmung von Lastkraftwagenmotoren eingesetzt [EPC99]. Sowohl der FIGE-Zyklus als auch der ETC bestehen aus den drei Abschnitten Stadt, Landstraße und Autobahn. Während der FIGE-Zyklus eine Soll-Fahrgeschwindigkeit über der Zeit vorgibt, enthält der ETC normierte zeitvariable Sollvorgaben für das Drehmoment und die Drehzahl am Verbrennungsmotor. Damit handelt es sich beim ETC entsprechend Kapitel 2.3.2 um einen Leistungszyklus, der auf einem Verbrennungsmotorprüfstand abgefahren wird. Die Normierung erfolgt anhand der Volllastkennlinie des Verbrennungsmotors.

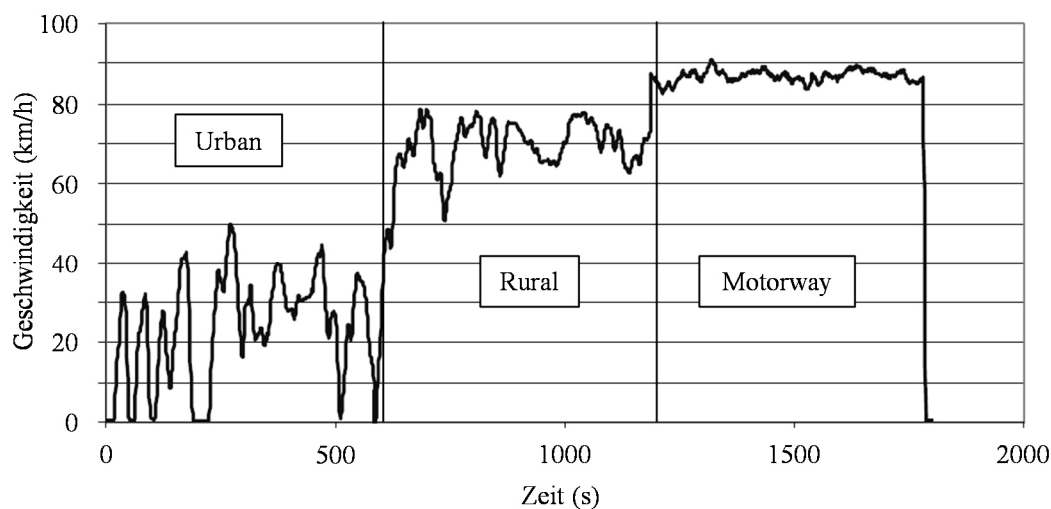


Bild 2.6: FIGE-Zyklus nach [Bar09a] und [EPC99]

Der ESC hingegen gibt 13 normierte und statische Betriebspunkte aus Drehmoment und Drehzahl am Verbrennungsmotor vor, die in einer vorgegebenen Reihenfolge am Prüfstand abzufahren und jeweils eine definierte Zeitdauer zu halten sind. Neben dem Leerlauf umfassen diese Betriebspunkte drei Drehzahlniveaus mit jeweils vier Drehmomentstufen. Beim ELR wird der Verbrennungsmotor bei jedem der drei Drehzahlniveaus mit drei aufeinanderfolgenden Lastsprüngen von 10 % auf 100 % des normierten Drehmoments beaufschlagt [EPC99].

Neben den beschriebenen Zyklen und Tests zur Emissionsbestimmung von Nutzfahrzeugmotoren sollen in der Europäischen Union zur zukünftigen Bestimmung des Verbrauchs bzw. der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge wegbasierte Einsatzprofile zum Einsatz kommen. Diese Einsatzprofile werden im *Vehicle Energy consumption Calculation Tool* (VECTO) hinterlegt und in Kombination mit einer fahrzeugspezifischen Vermessung von Komponenten zur simulationsbasierten Verbrauchsbestimmung verwendet [LOT11], [LOT12]. Zur Abbildung typischer Aufgaben wurden jeweils 5 Einsatzprofile für Lastkraftwagen und Busse entwickelt. Für den Lkw reichen diese vom Fernverkehr über den innerstädtischen Verkehr bis hin zum Baustellenverkehr. Ferner wurden anhand der Achs- und Chassiskonfiguration sowie des zulässigen Gesamtgewichts unterschiedliche Fahrzeugklassen definiert, denen jeweils ein oder

mehrere gültige Einsatzprofile zugewiesen sind. Für eine zweiachsige Sattelzugmaschine mit angetriebener Hinterachse und einem zGG größer 16 t gelten bspw. die Lkw-Profile für den Fernverkehr und regionalen Verteilerverkehr, wohingegen der allradbetriebenen Sattelzugmaschine lediglich der Baustellenzyklus zugewiesen ist [LOT12]. Alle Einsatzprofile enthalten eine zu fahrende Zielgeschwindigkeit und eine Steigungsvorgabe über dem Weg, wie exemplarisch für das Einsatzprofil des regionalen Verteilerverkehrs in Bild 2.7 ersichtlich ist. Zur Darstellung der Vorgänge bei Fahrgeschwindigkeit Null werden Haltezeiten separat vorgegeben [Luz14].

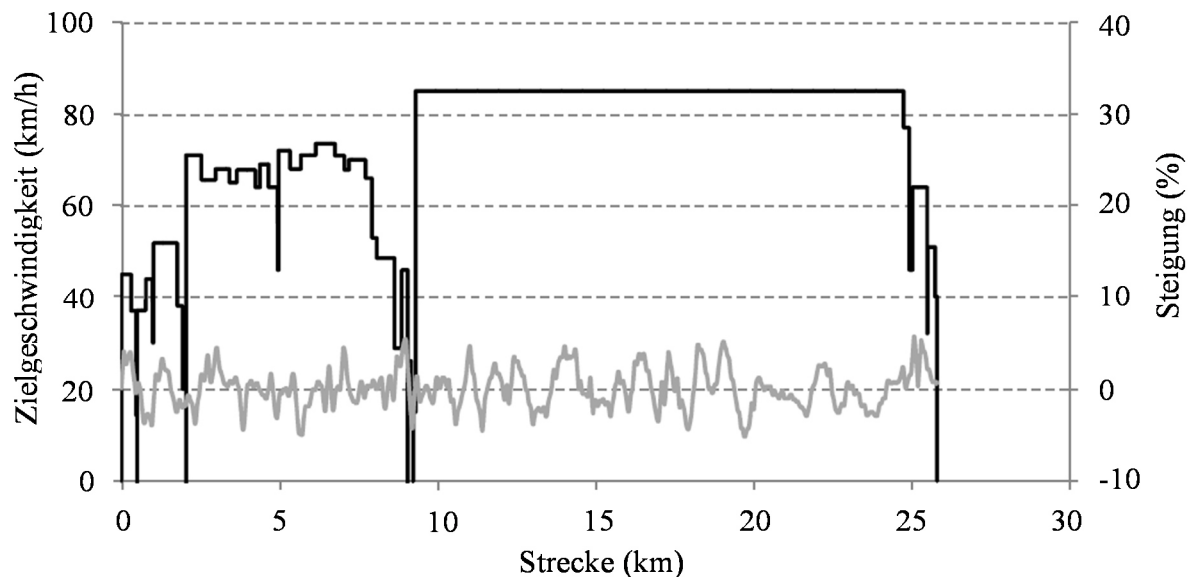


Bild 2.7: Einsatzprofil Regional delivery aus VECTO nach [DGC14]

Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs werden die wegbasierten Einsatzprofile in mehreren Schritten in zeitbasierte Fahrzyklen überführt. Zunächst werden zur Berücksichtigung von Fahrerhandlungen und Funktionen gängiger Fahrerassistenzsysteme (vorausschauendes Rollen und Verzögern, Overspeed, Ecoroll) die rechteckigen Zielgeschwindigkeitsprofile um zeitbasierte Sollgeschwindigkeitsverläufe während Verzögerungs- oder Rollphasen ergänzt [Luz14]. Im weiteren Verlauf wird auf Basis des zeitbasierten Geschwindigkeitsprofils und unter Berücksichtigung einer hinterlegten Schaltstrategie für jeden Zeitschritt des Zyklus die Leistung am Rad und am Verbrennungsmotor berechnet. Beim Überschreiten der Maximalleistung des Dieselmotors im aktuellen Betriebspunkt wird für den jeweiligen Zeitschritt die Ist-Geschwindigkeit in einer Schleife stetig bis zum Erreichen der Maximalleistung verringert. Auf diese Weise stellt sich die Fahrgeschwindigkeit in Phasen der Untermotorisierung, wie bei Beschleunigungsvorgängen oder an Steigungen, frei in Abhängigkeit der Fahrzeug- und Antriebsstrangparameter ein. Trotz der wegbasiert definierten Einsatzprofile kann es aufgrund der Umrechnung in die zeitbasierte Geschwindigkeitsvorgabe bei nicht übereinstimmender Ist- und Zielgeschwindigkeit zu unerwünschten Abweichungen zwischen dem zurückgelegten Weg und der Sollvorgabe des Einsatzprofils kommen (vgl. Kapitel 2.3.2). Diesem Umstand wird in VECTO durch das nachträgliche Hinzufügen oder Entfernen einzelner Zeitschritte begegnet [Luz14].

Während die bisher genannten Einsatzbeschreibungen in Form von Fahrzyklen oder Einsatzprofilen hinsichtlich der definierten Fahraufgabe unveränderlich sind, ist im Standardized On-Road Test (SORT) für Niederflurbusse explizit eine Anpassung der Einsatzbeschreibung an betreiber-individuelle Linieneinsätze vorgesehen [Bau04]. Die SORT-Zyklen wurden im Rahmen eines Projekts erarbeitet, das vom UITP, dem internationalen Verband für öffentliches Verkehrswesen, initiiert wurde und an dem Verkehrsbetriebe, Fahrzeughersteller und Zulieferer beteiligt waren [Eti01]. Ziel des Projekts war die Schaffung einer objektiven Vergleichbarkeit unterschiedlicher Antriebsstränge und Fahrzeuge hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs unter realitätsnahen Betriebsbedingungen. Zu diesem Zweck wurden drei Zyklen SORT 1 bis SORT 3 definiert, die hinsichtlich der Höchstgeschwindigkeit, der Stoppzeit je Zyklus, der Anzahl an Stopps und der daraus resultierenden Durchschnittsgeschwindigkeit typisch für einen schweren und leichten innerstädtischen Betrieb sowie einen Vorortverkehr sind [Bau04]. Durch eine beliebige Kombination, Aneinanderreihung und Wiederholung der drei Zyklen lassen sich individuelle und beliebige Linieneinsätze nachbilden. Ein Hauptaugenmerk bei der Zyklengestaltung lag auf einem einfachen Aufbau und einer leichten Reproduzierbarkeit der Zyklen, weshalb sich die SORT-Zyklen aus jeweils drei trapezförmigen Geschwindigkeitsprofilen zusammensetzen. Auf diese folgt jeweils ein Stopp gleicher Dauer, aus denen sich die Stoppzeit im gesamten Zyklus zusammensetzt.

Als weitere Einsatzbeschreibungen aus dem Bereich der schweren Nutzfahrzeuge sind Rundstrecken im öffentlichen Straßenverkehr zu nennen, die von Fachzeitschriften für vergleichende Fahrleistungs- und Verbrauchsmessungen verwendet werden. Es handelt sich bei diesen nicht um legislative oder standardisierte Einsatzbeschreibungen. Die Rundstrecken sind jedoch innerhalb der Branche etabliert und auf diesen gemessene Ergebnisse werden als Vergleichskriterium herangezogen. Die Einsatzbeschreibungen liegen als verbale Fahranweisung hinsichtlich der zu fahrenden Route vor und gegenüber den vorherigen Ansätzen nicht als zeit- oder wegbasierte Geschwindigkeitsvorgabe im Sinne eines Fahrzyklus. Dennoch bestehen Schnittmengen, da beispielsweise in Abhängigkeit des aktuell befahrenen Streckenabschnitts höchstzulässige Geschwindigkeiten vorgegeben sind. Die Fachzeitschrift *lastauto omnibus* verwendet derzeit eine Rundstrecke im Raum Trier nahe der Grenze zu Luxemburg und Belgien. Für Verbrauchsmessungen werden ausgehend von der Raststätte Hochwald-Ost die Autobahnen A 62, A 60 und A 1 befahren. Wendepunkte liegen jeweils an den Ausfahrten Prüm und Kusel, womit die Rundstrecke wieder am Startpunkt endet [Zei10]. Demgegenüber nutzt die Fachzeitschrift VerkehrsRUNDSCHAU eine Rundstrecke im Südosten Deutschlands. Befahren werden die Autobahnen A 9 und A 93 zwischen München und Regensburg, die A 3 zwischen Regensburg und Nürnberg, die A 9 zwischen Nürnberg und Langenbruck, die Bundesstraße B 300 und zuletzt die Autobahnen A 8, A 99 und A 92 in Richtung Startpunkt [Grü12]. Während die Fahraufgabe und der damit nachgebildete Einsatzfall unveränderlich sind, besteht in Phasen der Unter- und Übermotorisierung analog der wegbasierten Geschwindigkeitsvorgabe eine Adaptierbarkeit an das betrachtete Fahrzeug.

Vom Grundsatz her analoge Beispiele für verbal formulierte zyklische Fahraufgaben oder Einsatzbeschreibungen aus dem Bereich der mobilen Maschinen sind der Linde Gabelstapler-Leistungstest und die VDI-Richtlinie 2198 für Flurförderzeuge (s. Bild 2.8). Im Linde-Test ist ein 3-mal zu wiederholendes Arbeitsspiel definiert, nach dessen Vorgaben ein Gabelstapler einen mit 12 Gitterboxen beladenen Lkw so schnell wie möglich be- und entladen soll. An der Entladestelle sind jeweils 2 Gitterboxen zu stapeln [IMD09]. Das Gewicht einer Gitterbox beträgt ca. 800 kg [LMH09]. Die VDI-Richtlinie 2198 definiert dagegen je nach Typ des Flurförderzugs ein zyklisch zu wiederholendes einzelnes Arbeitsspiel. Die Fahr- und Arbeitsgeschwindigkeit ist bei der Umsetzung derart einzustellen, dass in einer Stunde eine festgelegte Anzahl an Wiederholungen erreicht wird und sich somit ein standardisierter Verbrauch pro Stunde einstellt. Für den Gabelstapler besteht das Arbeitsspiel aus einer Fahrt zwischen zwei 30 m entfernten Punkten und einem Hub mit einer Höhe von jeweils 2 m an den beiden Endpunkten. Dieses ist innerhalb der festgesetzten Dauer von einer Stunde 60-mal zu wiederholen [VDI02]. Obwohl die Richtlinie das Arbeitsspiel wegbasiert vorgibt, lässt sich durch die überlagerte Vorgabe der zu benötigenden Zeitdauer die Produktivität verschiedener Maschinen nicht bestimmen. Dies ist wiederum aufgrund der nicht vorhandenen zeitlichen Beschränkung mit dem Linde-Test möglich.

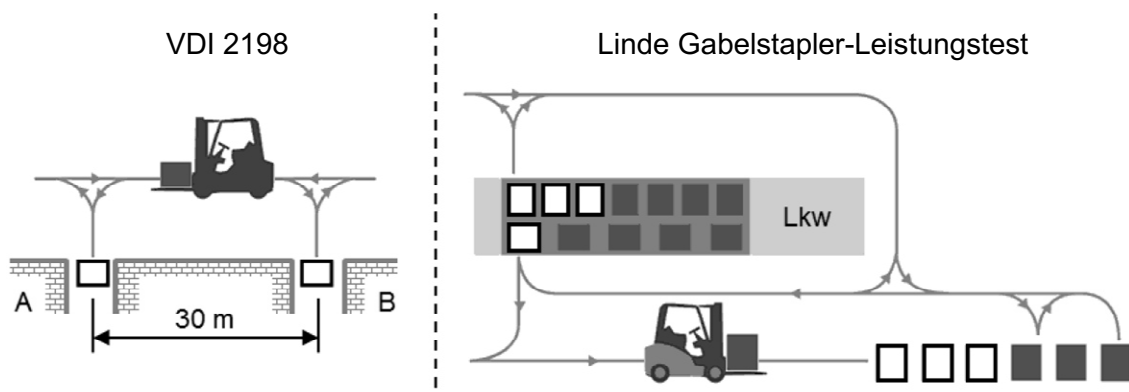


Bild 2.8: Arbeitsspiele für Gabelstapler nach [VDI02] und [IMD09]

Auch für Radlader existiert mit dem Liebherr Normtest ein entsprechend definiertes Arbeitsspiel [LWB15]. Schüttgut ist im für Radlader typischen Y-Zyklus an einem Ort A aufzunehmen, zu einer 20 m entfernten Abladestelle B zu transportieren und dort bei einer Ausschütthöhe von 2,5 m zu entladen. Für dieses Arbeitsspiel ist die zu benötigende Zeitdauer auf 35 s festgelegt. Durch DEITERS wurde ebenfalls am Beispiel des Radladers eine Methode entwickelt, mit der auf Basis gemessener Zyklen ein standardisierter Fahr- bzw. Lastzyklus bestimmt werden kann (vgl. [Dei09]). Die Methode ist im folgenden Kapitel vorgestellt.

Zur praxisnahen Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs von Traktoren wurde der DLG-PowerMix entwickelt [Deg03]. In diesem Testverfahren sind zur Beschreibung des Maschineneinsatzes mehrere Zyklen definiert, die typische Arbeitsaufgaben eines Traktors widerspiegeln. Die Zyklen enthalten jeweils zeitvariable Sollvorgaben für die Zug-, Zapfwellen- und Hydraulikleistung. Zusätzlich sind je Zyklus die Fahrgeschwindigkeit und/oder die Zapfwellendrehzahl als

Konstanten vorgegeben. Beispiele für die durch die Zyklen beschriebenen Arbeitsaufgaben sind das Pflügen mit im Wesentlichen Zugleistungsbedarf, das Mähen mit hauptsächlich Zapfwellenbetrieb oder das Betreiben einer Presse mit einer kombinierten Leistungsanforderung [Deg05]. Die Belastung des Traktors bzw. dessen Antriebsstrangs erfolgt im Test durch einen Messwagen. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Fahrzyklen wird durch die Zyklen des DLG-PowerMix direkt eine Leistung vorgegeben. Es handelt sich demnach um Leistungszyklen entsprechend des vorherigen Kapitels. Zur Adaption der zyklusspezifischen Leistungsvorgabe an den betrachteten Traktor ist eine Skalierung der Sollwerte anhand der im stationären Betrieb gemessenen maximalen Zapfwellenleistung des Traktors vorgesehen. Hinsichtlich der Absolutwerte ist somit eine Adaption der Zyklen an die Leistungsfähigkeit des Traktors möglich, eine Adaption der Dynamik jedoch nicht. Bei dynamischen Sollwertänderungen sind trotz genannter Skalierung die Effekte der Unter- oder Übermotorisierung nicht auszuschließen.

2.5 Methoden zur Erzeugung einsatzindividueller Beschreibungen

Es bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Erzeugung von Einsatzbeschreibungen [Sim89]. Zum einen können gezielt Messungen im spezifischen Einsatz durchgeführt werden. Die gewonnenen Daten lassen sich anschließend in ihrer Gesamtheit zur Erzeugung der Einsatzbeschreibung und Nachbildung des vermessenen Einsatzes verwenden (s. Bild 2.9 links).

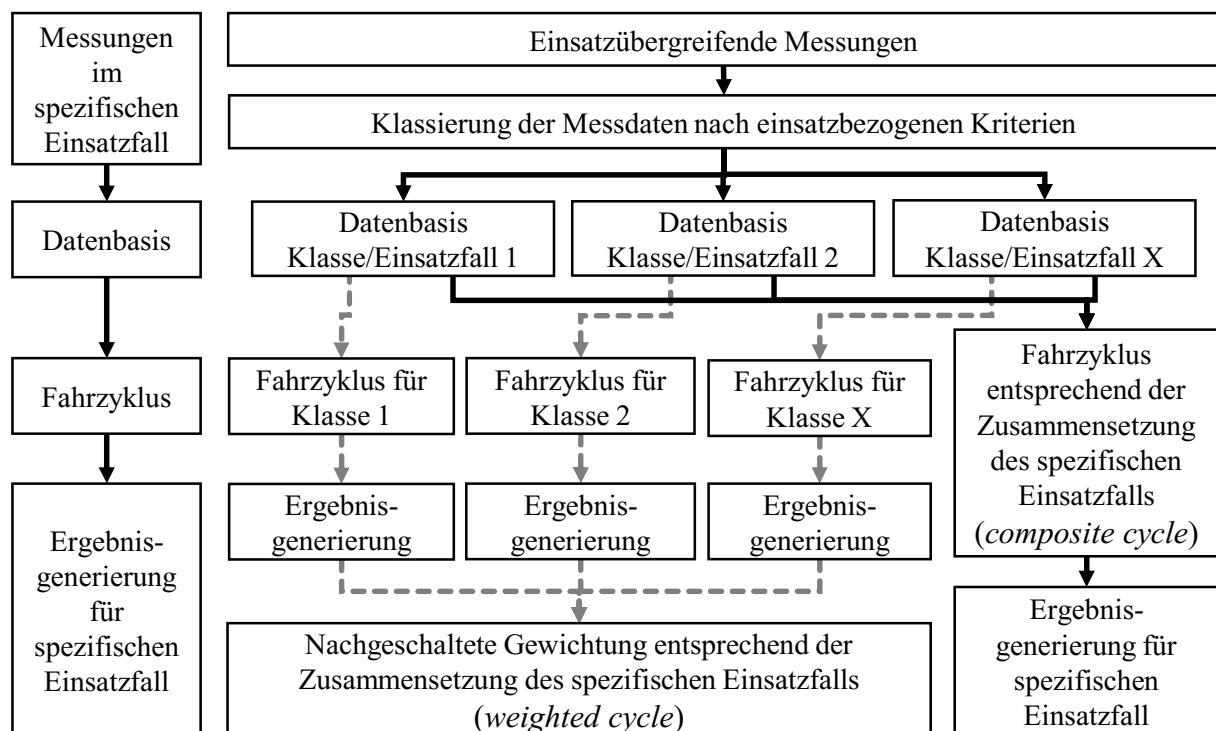


Bild 2.9: Grundsätzliche Möglichkeiten zur Erzeugung von Einsatzbeschreibungen/Fahrzyklen auf Basis von Messungen im Fahrzeugbetrieb

Zum anderen lassen sich einsatzunabhängige bzw. -übergreifende Messdaten und Informationen verwenden. Diese sind nach einsatzbezogenen Kriterien zu klassieren und können anschließend zur Nachbildung von spezifischen Einsätzen genutzt werden, die aus einer Kombination

der definierten Klassen bzw. Einsatzfälle bestehen. Über das zeitliche oder auch streckenbezogene Verhältnis der Klassen zueinander lassen sich unterschiedliche und individuelle Einsätze beschreiben. Ein anschauliches Beispiel sind von Nutzfahrzeugen genutzte Streckenarten, wie Stadt-, Land- und Schnellstraßen. Mittels einer gewichteten Kombination dieser Klassen bzw. Streckenarten lassen sich beliebige Einsätze vom Fern- bis zum Verteilerverkehr nachbilden.

Hinsichtlich der Kombination von Klassen in der Einsatzbeschreibung bestehen ebenfalls zwei Möglichkeiten, wie bspw. in [Zou04] ausgeführt (vgl. Bild 2.9 rechts). Bei gewichteten Einsatzbeschreibungen oder Fahrzyklen (im Englischen *weighted cycles*) wird für jede definierte Klasse ein separater Zyklus zur Ermittlung der korrespondierenden Ergebnisse herangezogen. Im Anschluss erfolgt eine nachgeschaltete Gewichtung der Ergebnisse anhand der einsatzspezifischen Gewichtung der Klassen. Dem stehen zusammengesetzte Fahrzyklen (*composite cycles*) gegenüber, bei denen die einsatzbezogene Gewichtung bereits im Zyklus berücksichtigt ist. Es wird nur ein Zyklus erzeugt und die darauf aufbauenden Ergebnisse sind direkt für den beschriebenen Einsatz gültig.

Darüber hinaus ist zwischen deterministischen und stochastischen Methoden zur Erzeugung von Einsatzbeschreibungen und Fahrzyklen zu unterscheiden. Deterministisch erzeugte Fahrzyklen weisen bei unveränderten Eingangsdaten immer die gleiche Gestalt auf. Demgegenüber variiert die Gestalt stochastisch erzeugter Zyklen trotz identischer Eingangsdaten. Das zugrunde liegende statistische Verhalten, wie etwa die Verteilung vorkommender Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, ist jedoch für alle stochastischen Zyklen idealerweise identisch.

Insgesamt existieren zur Erzeugung von Fahrzyklen oder anderer Beschreibungsformen viele unterschiedliche Ansätze und Methoden mit teils regionalen und fahrzeugspezifischen Ausprägungen. Nachfolgend ist vor diesem Hintergrund lediglich eine Auswahl mit dem Fokus auf schweren Nutzfahrzeugen aufgeführt.

2.5.1 Deterministische Ansätze

Auf einsatzindividuellen Messungen basierende Ansätze

Als Beispiel für einen deterministischen und auf einsatzindividuellen Messungen basierenden Ansatz zur Erzeugung von Fahrzyklen ist die Arbeiten von SÜSSMANN zu nennen. Zur Bewertung verbrauchreduzierender technischer Maßnahmen an schweren Nutzfahrzeugen werden kundenspezifische und individuelle Fahrzyklen generiert, die neben der wegbasiert vorgegebenen Zielgeschwindigkeit Informationen zur Fahrbahnsteigung und Beladung enthalten [Süß15]. Die Erzeugung der Fahrzyklen basiert auf Messungen beim Fahrzeugbetreiber für dessen spezifische Einsatzprofile. Im Betrieb werden je Einsatzprofil u.a. die Geschwindigkeit, die prozentuale Auslastung des Verbrennungsmotors und der Luftdruck zur Ableitung des Steigungsprofils der Strecke aufgezeichnet. Die für eine Fahrt oder einen Umlauf gewonnenen zeitbasierten Messdaten dienen direkt der Erzeugung des wegbasierten Fahrzyklus, indem die gefahrene Geschwindigkeit und das abgeleitete Steigungsprofil über dem zurückgelegten Weg aufgetragen werden. Anhand der Motorauslastung werden Streckenabschnitte detektiert, in denen

die Geschwindigkeit des Fahrzeugs aufgrund einer Untermotorisierung der Wunsch- bzw. Zielgeschwindigkeit nicht oder nur verzögert folgen konnte. Beispiele sind Volllast-Phasen an Steigungen oder bei Beschleunigungen. Im Fahrzyklus wird für die entsprechenden Streckenabschnitte die gemessene Geschwindigkeit durch die Zielgeschwindigkeit ersetzt. In Verzögerungsphasen wird demgegenüber das gemessene Geschwindigkeitsprofil beibehalten. Der auf diese Weise erzeugte Fahrzyklus spiegelt die im individuellen Einsatzprofil des Betreibers durchgeführten und messtechnisch erfassten Einzelfahrten wider.

Einen weiteren Ansatz zur Ableitung wegbasierter Geschwindigkeitsvorgaben für schwere Nutzfahrzeuge stellt BRUNEEL vor [Bru00]. Basis sind gemessene Geschwindigkeitsprofile, eine einsatzbezogene Klassierung ist nicht vorgesehen. Steigungsinformationen sind im Fahrzyklus nicht enthalten. Die Geschwindigkeitsvorgabe basiert auf einer Abfolge sogenannter Phasen. Jede Phase verfügt über eine Streckenlänge, eine Startgeschwindigkeit am Startpunkt, eine über die Länge konstante maximale Geschwindigkeit und eine Endgeschwindigkeit am Endpunkt. Während sich die Ist-Geschwindigkeit bei Beschleunigungsvorgängen frei in Abhängigkeit der Fahrzeugparameter einstellen kann, wird zur Gewährleistung eines gleichbleibenden Verzögerungsverhaltens eine konstante Verzögerungsrate zur Korrektur des Sollgeschwindigkeitsverlaufs herangezogen. Entsprechend Definition besteht jede Phase aus den Bewegungszuständen Beschleunigung, Konstantfahrt und Verzögerung. Auf Basis des Erkennens dieser Bewegungszustände können aus gemessenen Geschwindigkeitsprofilen Phasen extrahiert, hinsichtlich festgelegter Eigenschaften ausgewertet und Klassen zugeordnet werden. Die Generierung eines Fahrzyklus erfolgt durch Auswahl einer Phase je Klasse mit einer für diese repräsentativen Länge. Die gewählten Phasen werden u.a. anhand der Start- und Endgeschwindigkeiten zum Fahrzyklus aneinandergefügt. Abschließend wird der auf Basis des Zyklus ermittelte Verbrauchswert aufgeteilt und wieder den einzelnen Phasen zugewiesen. Anhand des wegbasierten Anteils jeder Phase an den ursprünglichen Messdaten erfolgt die gewichtete Berechnung des finalen Verbrauchswerts. Damit spiegelt nicht der Fahrzyklus die ursprüngliche Messfahrt wider, sondern erst das gewichtete Ergebnis.

Für mobile Arbeitsmaschinen wurden ebenfalls verschiedene Methoden zur Erzeugung von Fahrzyklen und Einsatzbeschreibungen veröffentlicht, die auf Messungen in einem individuellen und spezifischen Einsatz des jeweiligen Maschinentyps beruhen. Als Beispiel seien Ansätze zur Beschreibung von Ladearbeiten im sogenannten Y-Zyklus genannt. Bei diesem handelt es sich um ein Ladespiel, bei dem die Maschine Ladung in Vorwärtsfahrt aufnimmt, zurücksetzt und zum Entladen an einer benachbarten Position wieder vorfährt. Dieser Prozess, typischerweise von Radladern, Traktoren mit Frontlader oder Teleskopladern durchgeführt, wiederholt sich zyklisch. Durch DEITERS wurde mit dem Ziel einer Effizienzbewertung von Radladerantrieben eine Methode zur Standardisierung gemessener zeitbasierter Leistungszyklen erarbeitet [Dei09]. Grundlage ist die kontinuierliche Aufzeichnung mehrerer zusammenhängender Y-Zyklen im Betrieb. Innerhalb dieser Daten werden einzelne Zyklen sowie deren Abschnitte

identifiziert und separiert. Diese Zeitverläufe werden synchronisiert, skaliert und zum standardisierten Zyklus im Sinne eines gemittelten Verlaufs zusammengeführt. Als Ergebnis für den Fahrtrieb liegt zuletzt ein standardisierter Leistungszyklus aus Geschwindigkeit und Zugkraft über der Zeit vor, der in rückwärtsgerichteten Simulationen und auf einem Antriebsstrangprüfstand nutzbar ist.

Aufgrund der Nachteile einer zeitbasierten Sollwertvorgabe wird die Einsatzbeschreibung durch BAUMGARTEN in einem statistikbasierten Bedienermodell hinterlegt, das in einer Gesamtmaschinensimulation unter Einbeziehung der Prozessumgebung zu verwenden ist [Bau14]. Das Bedienermodell ist für den spezifischen Einsatzfall des Y-Zyklus gültig und beschreibt diesen in generischer Form. Es reagiert wie ein realer Bediener auf Maschinen- und Prozesszustandsgrößen und übergibt resultierende Sollvorgaben wie Pedal- oder Joystickaushlenkungen an das Maschinenmodell. Das Bedienverhalten ist dabei unabhängig von Maschinenparametern. Damit ist eine objektive Vergleichbarkeit alternativer Antriebskonfigurationen oder anderweitiger dynamik- und produktivitätsbeeinflussender Maßnahmen gegeben. Das Bedienermodell basiert auf den statistischen Methoden der Gaussian Mixture Model und einer Maximum-A-posteriori-Schätzung. Lern- und Testdaten werden analog [Dei09] durch die messtechnische Erfassung realer Y-Zyklen, in diesem Fall für einen Traktor mit Frontlader und unterschiedlich erfahrene Bediener, gewonnen. Mit gleicher Motivation wurde ein alternatives Bedienermodell durch FILLA für Radlader entwickelt [Fil05]. In der Phase des Füllens der Schaufel wird der Bediener regelbasiert modelliert. In den restlichen Phasen des Y-Zyklus ist das Bedienermodell als Zustandsautomat realisiert. Handlungsweisen sind als diskrete Zustände abgebildet, zwischen denen beim Eintreten definierter Ereignisse gewechselt wird.

Zur Ableitung von Fahrzyklen für Verteiler-Lkw in Verdichtungsräumen wurden Messungen mit entsprechenden Fahrzeugen durchgeführt [Fei97]. Anhand der Stadt- und Verkehrsstruktur wurden für die Messungen verschiedene Städte und Regionen in den Kategorien Innenstadt, Stadtgebiet und Großraum ausgewählt. Aus den gewonnenen Messdaten wird je Kategorie bzw. Einsatzprofil direkt ein zeitbasierter Zyklus für die Fahrgeschwindigkeit ausgewählt. Dieser Ansatz kann als Übergang von einsatzindividuellen Messungen zur einsatzbezogenen Klassierung von Messdaten angesehen werden: es erfolgte zwar eine Klassierung der Einsatzprofile, die Messungen wurden jedoch separat je Einsatzprofil durchgeführt.

Auf einsatzübergreifenden Messungen und einer Klassierung basierende Ansätze

Als Grundlage zur Bestimmung des Verbrauchs und der Emissionen von Müllsammelfahrzeugen schlugen BENDER und SAWODNY eine Methode zur Ableitung zeitbasierter Fahrzyklen unter Einbeziehung der variierenden Fahrzeugmasse und der Fahrbahnsteigung vor [Ben15]. Als Beispiel dienen Messungen an einem Fahrzeug in Stuttgart. Mit dem Fokus auf dem Sammelbetrieb werden innerhalb einzelner Tagestouren im Sinne einer Klassierung alle weiteren einsatzspezifischen Fahrtanteile (Fahrten zwischen Depot, Müllhalde und Sammelgebiet) aus-

geschlossen. Für den Sammelbetrieb werden übergreifend über alle Tagestouren Charakteristiken, wie bspw. die Durchschnittsgeschwindigkeit, das Verhältnis aus Stand- zu Fahrtzeit, die mittlere Haltezeit zwischen zwei Mikrotrips¹ oder die mittlere Zuladungsmasse, berechnet. Alle Tagestouren können anschließend nach kontinuierlichen Fahrtabschnitten mit entsprechenden Charakteristiken durchsucht werden. Der Abschnitt mit den am besten übereinstimmenden Charakteristiken wird als repräsentatives Abbild des Sammelbetriebs ausgewählt. Da es sich um ein kontinuierlich gemessenes Geschwindigkeitsprofil handelt ist eine direkte Zuordnung des zeitlich korrespondierenden Höhenprofils und der Zuladungsmasse möglich.

PARK et al. schlagen für schwere Nutzfahrzeuge einen zeitbasierten Fahrzyklus ohne Berücksichtigung der Fahrbahnsteigung vor [Par13]. Zur Gestaltung des Fahrzyklus wurde zunächst der reale Fahrzeugbetrieb für fünf Fahrzeugklassen (Stadtbus bis schwerer Lkw) erfasst. Anhand der statistischen Verteilung der Beschleunigung je Fahrgeschwindigkeit und der Motorbetriebspunkte erfolgt fahrzeugklassenbezogen ein Abgleich der Messdaten mit den entsprechenden Ergebnissen für existierende und bereits veröffentlichte Zyklen. Der Fahrzyklus mit der im Mittel für alle Fahrzeugklassen besten Übereinstimmung, in diesem Fall der WHVC (vgl. [DIE15]), wird für die weiteren Betrachtungen herangezogen und hinsichtlich der enthaltenen Geschwindigkeitsrampen an das Beschleunigungspotential schwerer Nutzfahrzeuge angepasst. In Anlehnung an den WHVC wird der modifizierte Zyklus in die Abschnitte urban, rural und motorway eingeteilt. Eine bessere Wiedergabe der realen Fahrbedingungen erfordert abschließend eine unterschiedliche Gewichtung der Streckenabschnitte je nach Fahrzeugklasse (z.B. Stadtbus 8/2/0 und Sattelzugmaschine 1/3/6, jeweils für Verteilung urban/rural/motorway).

Einen Ansatz zur Erzeugung zeitbasierter Fahrzyklen anhand von Vorgaben zur prozentualen Verteilung der enthaltenen Streckenarten stellen ZOU et al. vor [Zou04]. Beispielanwendung sind mittelschwere hybrid-elektrische Nutzfahrzeuge im Verteilerbetrieb. Gesprächsergebnisse mit Flottenbetreibern bilden die Basis zur Vorgabe der prozentualen Zusammensetzung der Fahrstrecke aus den Elementen Stadt-, Vorstadt- und Autobahnverkehr. Informationen zur mittleren Geschwindigkeit und einer definierten Anzahl an Stopps pro Strecke vervollständigen die Vorgaben. Eine Analyse existierender Fahrzyklen auf die Erfüllung der Kriterien analog [Par13] lieferte keine zufriedenstellende Ergebnisse, weshalb aus den Mikrotrips der zuvor betrachteten Fahrzyklen neue vollständige Zyklen zusammengesetzt werden.

GALLO wendet zur Bestimmung regionaler Verteilerzyklen für schwere Sattelzüge ein alternatives Verfahren an [Gal14]. Wie zuvor handelt es sich beim Ergebnis um eine zeitbasierte Sollgeschwindigkeitsvorgabe ohne Steigungsinformation. Grundlage ist die Messung der Geschwindigkeit mehrerer im Verteilerverkehr eingesetzter Sattelzüge über einen längeren Zeit-

¹ Als Mikrotrip wird ein Fahrtabschnitt zwischen einem und dem darauffolgenden Halt bezeichnet. Häufig wird auch die Haltedauer am Ende des Fahrtabschnitts dem Mikrotrip zugerechnet.

raum. Für jede auswertbare Einzelfahrt wird die maximale Geschwindigkeit über der Durchschnittsgeschwindigkeit in einem Diagramm aufgetragen. Aus der resultierenden Punktwolke werden zwecks Klassierung fünf typische Betriebsmodi abgeleitet (Idle, Creep, Low Speed Transient, High Speed Transient, Cruise). Je Modus erfolgt anhand der Durchschnittsgeschwindigkeit, der Zeit im Leerlauf und der Anzahl an Stopps pro Strecke die Auswahl eines repräsentativen Fahrtspiels. Mit den Erfahrungen aus der Fahrzeugvermessung und auf Basis von Gesprächen mit Flottenbetreibern werden abschließend Fahrzyklen aus den Fahrtspielen je Betriebsmodus zusammengesetzt.

Eine weitere deterministische Methode zur Erzeugung zeitbasierter Fahrzyklen ohne Steigungsinformation wurde von ANDRÉ am Beispiel von Pkw veröffentlicht [And04]. Diese diente im ARTEMIS-Projekt zur Entwicklung der gleichnamigen Fahrzyklen. Grundlage ist die Vermessung des realen Fahrzeugbetriebs unabhängig von spezifischen Einsatzprofilen. In den Messdaten werden anhand der Querverteilung von Beschleunigung und Geschwindigkeit sowie den Zeitanteilen im Leerlauf 12 voneinander abgrenzbare Segmente bzw. Fahrzustände ähnlicher Dauer identifiziert, die u.a. innerstädtische Fahrsituationen, Fahrten auf Haupt- oder Nebenstraßen sowie Autobahnfahrten bei jeweils unterschiedlichen Verkehrsdichten repräsentieren. Anschließend werden vollständige Fahrten hinsichtlich der vorkommenden Fahrzustände analysiert und darüber die drei Klassen urban, rural und motorway definiert. Zur Erzeugung eines Zyklus je Klasse werden repräsentative Geschwindigkeitsverläufe je Fahrzustand aus den Messdaten ausgewählt und unter Berücksichtigung der Reihenfolge, der Start- und Endgeschwindigkeit sowie weiterer Parameter aneinander gereiht.

Ein statistikbasierter Ansatz ist innerhalb der 3F-Methode über einen *Statistical Driver Simulator* realisiert. Die 3F-Methode wurde von KÜÇÜKAY vorgestellt (vgl. [Küç90], [Küç92]) und berücksichtigt zur ganzheitlichen und kundenrelevanten Auslegung und Bewertung von Fahrzeugen und deren Komponenten den dreidimensionalen Parameterraum aus Fahrer, Fahrumgebung und Fahrzeug. In einer anhand der Parameter aufgespannten Matrix repräsentiert jeder Eintrag und damit jede mögliche Kombination von Fahrer, Fahrumgebung und Fahrzeug einen Kundentypen mit dessen spezifischen Eigenschaften. Je nach Fahrzeugtyp und Problemstellung kann der 3F-Parameterraum unterschiedlich definiert werden. Zur Anwendung gelangte die 3F-Methode beispielsweise zur Bestimmung von Lastkollektiven an Getriebe- [Mül02] und Fahrwerkskomponenten [Jan07] von PKW oder für Verbrauchsbetrachtungen beim Einsatz hybrider Antriebsstränge [Fug10]. Die Arbeit von WEILER zur Adaption der Methode an die Auslegung des Antriebsstrangs schwerer Nutzfahrzeuge [Wei14] dient im weiteren Verlauf zur ausführlicheren Vorstellung der Methode. Grundlage zum Aufbau des Parameterraums ist die Vermessung von Fahrzeugen im realen Betrieb. Die Datenerfassung erfolgt übergreifend über verschiedene Einsatzprofile mit unterschiedlichen Fahrern, was eine nachgeschaltete Klassierung erforderlich macht. Bezogen auf das Fahrzeug definiert WEILER die drei Beladungszustände *leer*, *mittel* und *voll*. Die Zuordnung zu einer Klasse basiert auf festen Grenzwerten des Gesamtgewichts. Hinsichtlich des Fahrers wird anhand eines steigungs- und

massenabhängig berechneten Dynamikfaktors zwischen den beiden Typen *sparsam* und *dynamisch* differenziert. Für die Fahrumgebung werden die drei Varianten *Verteiler-*, *Nah-* und *Fernverkehr* definiert. Sie bestehen jeweils aus einer spezifischen Kombination der Streckenarten Stadt, Landstraße und Autobahn, zwischen denen wiederum anhand der Wegeanteile vorkommender Fahrgeschwindigkeiten unterschieden wird. Daraus resultiert für den dreidimensionalen Parameterraum eine 3x2x3-Matrix mit insgesamt 18 Einträgen. Nach entsprechender Auswertung der Messdaten liegen je Einzelfahrzeug oder auch für alle vermessenen Fahrzeuge Ergebnisse zu den unterschiedlichen Anteilen einer Kombination des Parameterraums und damit eines Kundentypen vor. Zur Simulation des Fahrzeugbetriebs für einen Kundentypen wird der einleitend genannte *Statistical Driver Simulator* verwendet. Es handelt sich um ein statistikbasiertes Fahrer- und Fahrumgebungsmodell, das auf einander folgenden diskreten Fahrzuständen basiert und ausführlich in [Mül02] beschrieben ist. Im Orientierungsgeschwindigkeitssteigungsprofil sind in Abhängigkeit der aktuellen Zielgeschwindigkeit und Fahrbahnsteigung die entsprechenden Werte für den jeweils darauffolgenden Zustand enthalten. In Abhängigkeit der Ziel- und Istwerte geben weitere Profile die im Fahrzustand zurückzulegende Distanz oder die vom Fahrermodell zu wählende Gaspedalstellung und den Gaspedalgradienten vor. Die Datensätze bzw. Profile werden durch Auswertung der zeitbasierten Messdaten je Kundentyp gewonnen. Ein eigentlicher Fahrzyklus mit einer Geschwindigkeits- oder Steigungsvorgabe über dem Weg oder der Zeit existiert nicht. Die Verläufe stellen sich erst in der Simulation ein, indem das Fahrermodell mit Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgängen auf Änderungen im Zielgeschwindigkeitsprofil reagiert.

Neben den bisher aufgezeigten grundlegenden Möglichkeiten sind Einsatzbeschreibungen auch mittels statischer Betriebszustände realisierbar. Da dynamische Vorgänge in diesem Fall nicht berücksichtigt werden, bietet sich dies lediglich für statisch betriebene Fahrzeuge oder Maschinen an. So beschreibt FLECZORECK für eine Effizienzbewertung der Antriebe von Mähdrechern deren Einsatzprofile mittels einer begrenzten Anzahl an Betriebszuständen [Fle13]. Als Basis dienen Telematikdaten verschiedener Maschinen, die nach der Einsatzregion klassiert werden. Nach Identifikation aller für den Verbrauch relevanten Funktionen bzw. Abtrieben werden jene mit seltenem Betrieb und geringer Leistungsanforderung vernachlässigt und nicht weiter betrachtet. Anschließend werden anhand der Telematikdaten vorkommende und voneinander abgrenzbare Betriebszustände definiert, die jeweils durch eine Kombination aktiver Funktionen und deren Leistungsanforderung gekennzeichnet sind. Wird jedem Betriebszustand ein Zeitanteil an der Betriebsdauer der Gesamtmaschine zugeordnet, lässt sich mit den Eigenschaften des Antriebsstrangs die Effizienz der Maschine in den einzelnen Betriebszuständen und dem gesamten Einsatzprofil berechnen.

Auf Streckendatenbanken basierende Ansätze

Zur Beschreibung einer Transportaufgabe für schwere Nutzfahrzeuge nutzt KOHRS ein Einsatzprofil, das neben einem wegbasiert vorgegebenen Streckendatensatz zusätzlich Informatio-

nen zur Fahrzeugkonfiguration, zu Beladungszuständen sowie zu Be-, Entlade- und Tankvorgängen enthält [Koh05]. Der Streckendatensatz zur abschnittswisen Beschreibung der Fahrstrecke ist in einer Matrix hinterlegt. Je Abschnitt sind eine zugehörige Länge, Fahrbahnsteigung, maximal zulässige Geschwindigkeit, der Streckentyp (Stadt, Landstraße, Autobahn) und ergänzend der Kurvenradius, Ereignisse (z.B. Ampeln) und die Anzahl an Fahrspuren vorgegeben. Die gewählte Form des Fahrzyklus erfordert bei simulativen Betrachtungen ein Fahrermodell, das in Abhängigkeit der modellierten Fahrweise, gesetzlicher Beschränkungen sowie der längs- und querdynamischen Grenzen des Fahrzeugs die Fahraufgabe und Geschwindigkeitsvorgabe umsetzt. Der Streckendatensatz kann entweder aus real und einsatzindividuell vermessenen Strecken abgeleitet oder synthetisch definiert werden.

Zur Erzeugung deterministischer Fahrzyklen und Einsatzbeschreibungen kann darüber hinaus auf Streckendatenbanken zurückgegriffen werden, wie sie beispielsweise für Navigationssysteme verwendet werden. Diese werden u.a. bei der Entwicklung und dem Einsatz prädiktiver Energiemanagementsysteme für Elektrofahrzeuge zur Ableitung bzw. Schätzung strecken- und wegbasierter Geschwindigkeitsverläufe genutzt. Entsprechende Informationen können zudem als wegbasierte Einsatzbeschreibung für eine spezifische Fahrt verstanden und in Kombination mit einem geeigneten Fahrer und Fahrzeugmodell zur simulationsbasierten Verbrauchs- und Emissionsbestimmung verwendet werden.

BÖHME et al. haben zur Entwicklung eines Energiemanagementsystems verschiedene Strecken durch mehrmaliges Befahren mit einem Fahrzeug selbst vermessen und die Streckendaten in einer Datenbank analog eines Geoinformationssystems hinterlegt [Böh13]. Die Gesamtstrecke ist unterteilt in Segmente, die eine bestimmte Länge, Steigung, Geschwindigkeitsbeschränkung, Verteilung an Verkehrsschildern oder einen Kurvenradius aufweisen. Die Abgrenzung der Segmente untereinander erfolgt anhand der Änderungen in den Geschwindigkeitsbeschränkungen oder den Steigungswerten. Da stochastisch auftretende geschwindigkeitsbeeinflussende Effekte, wie Fußgängerüberwege oder Ampelanlagen, in den Datenbanken nicht enthalten sind, werden diese zusätzlich über Normalverteilungen in Abhängigkeit der Tageszeit und der quasi-stationären Geschwindigkeit berücksichtigt. ENGSTLE et al. berechnen für ein vorausschauendes Energiemanagement und eine Simulation des Antriebssystems das erwartete Antriebsleistungsprofil für eine Fahrstrecke auf Basis zu erwartender Geschwindigkeits- und Steigungswerte [Eng14]. Die Abschätzung des Geschwindigkeitsprofils basiert auf dem Kartenmaterial des frei verfügbaren OpenStreetMap-Projekts. Die wegbasiert enthaltenen durchschnittlichen Geschwindigkeiten werden in ein zeitbasiertes Geschwindigkeitsprofil mit Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen sowie Stillstandszeiten umgerechnet. Über kommerziell verfügbare Verkehrslagedienste fließt die aktuelle Verkehrssituation in das Geschwindigkeitsprofil ein. Das Höhenprofil der Strecke wird über Daten der *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) generiert. Maschmeyer et al. schlagen die Nutzung eines analogen Ansatzes zur Bestimmung der Schadstoffemissionen von Fahrzeugen im realen Fahrbetrieb vor [Mas15]. Das System aus Fahrzeug, Fahrer und entsprechend beschriebener Fahrstrecke wird in Echtzeit

simuliert. Lediglich der Verbrennungsmotor wird mit den aus der Simulation stammenden Sollvorgaben des Fahrers und einer Rückgabe der zur Simulation benötigten Ist-Werte auf einem Motorenprüfstand betrieben.

2.5.2 Stochastische Ansätze

Das Vorgehen zur Erzeugung stochastischer Fahrzyklen ist meist ähnlich. Zunächst wird der reale Betrieb der jeweils betrachteten Fahrzeuge messtechnisch erfasst oder es wird auf bereits bestehende Daten zurückgegriffen. Anschließend werden die zeitbasiert vorliegenden Geschwindigkeitsverläufe hinsichtlich Abschnitten mit ähnlichen Eigenschaften analysiert und zu Klassen zusammengefasst. Bei den Abschnitten handelt es sich häufig um Mikrotrips, d.h. Fahrtabschnitte zwischen zwei Stopps. Zur Erzeugung eines Fahrzyklus werden aus den Klassen repräsentative Abschnitte zufällig ausgewählt oder es werden mittels statistischer Methoden neue Verläufe erzeugt. Das Zusammensetzen der Abschnitte zum Fahrzyklus erfolgt unter Beachtung übergeordneter Zielparameter, wie z. B. die Streckenlänge, Durchschnittsgeschwindigkeit oder Anzahl an Stopps. Die Zielparameter können entweder von einem Nutzer frei vorgegeben oder zur Nachbildung der Datenbasis aus dieser extrahiert werden. Stochastisch erzeugte Zyklen haben jeweils unterschiedliche Geschwindigkeitsverläufe, weisen jedoch die gleichen statistischen Eigenschaften auf und können als repräsentativ für den Realbetrieb angesehen werden. Mit der Nutzung stochastischer Fahrzyklen lässt sich bei der Entwicklung von Energiemanagementsystemen eine in der Regel ungewollte Optimierung auf einen festen Zyklus vermeiden, damit die Systeme im Realbetrieb für unterschiedliche Erfordernisse zufriedenstellende Ergebnisse liefern [Joh05], [Sch13]. Aufgrund der begrenzten Kapazität des Energiespeichers ist dies besonders für hybride oder rein-elektrische Fahrzeuge relevant, weshalb stochastisch erzeugte Zyklen häufig in dieser Fahrzeugklasse Anwendung finden. Der folgenden Auswahl veröffentlichter Ansätze ist gemein, dass jeweils ein zeitbasierter Fahrzyklus meist ohne Steigungsinformation erzeugt wird.

GONG et al. nutzen stochastisch erzeugte Fahrzyklen für Verbrauchsuntersuchungen einer Fahrzeugflotte aus Plug-In Hybridfahrzeugen [Gon11]. Eine aufgezeichnete Datenbasis aus gemessenen Geschwindigkeitsprofilen wird zunächst in Mikrotrips unterteilt. Diese werden hinsichtlich beschreibender Variablen ausgewertet. Zwecks Reduktion der erforderlichen Variablen zur aussagekräftigen Beschreibung der Datensätze wird eine Hauptkomponentenanalyse, im Englischen Principal Components Analysis (PCA), durchgeführt. Die PCA überführt für einen Datensatz die Anzahl beschreibender Variablen in einen kleineren Variablensatz, der einen Großteil der gesamten Varianz des Datensatzes abdeckt [Dun89]. Auf diese Weise wurden die vier Variablen Fahrzeit, Streckenlänge, maximale und durchschnittliche Geschwindigkeit als ausreichend zur Unterscheidung der Mikrotrips bestimmt und zu deren Einordnung in vier Klassen verwendet. Je Klasse wird aus den zeitbasierten Daten der Mikrotrips eine Übergangsmatrix zwischen vorkommenden Kombinationen aus Geschwindigkeit und Beschleunigung gebildet. Die Übergangsmatrix gibt ausgehend vom aktuellen Fahrzustand eine Wahrscheinlichkeit für den darauffolgenden Zustand an und wird zur Erzeugung eines Geschwindigkeitsprofils

und damit Fahrzyklus genutzt. Auf diese Weise werden Geschwindigkeitsverläufe für die Klassen der Mikrotrips erzeugt und in einem iterativen Vorgehen Zielvorgaben zur Anzahl an Stopps, Gesamtlänge oder zur maximalen und/oder durchschnittlichen Geschwindigkeit angenähert.

Grundsätzlich ähnliche Methoden und Ansätze zur Erzeugung von Fahrzyklen verwenden BALAU et al. [Bal15], JOHANNESSEN [Joh05] oder auch DEMBSKI et al. [Dem02]. Anwendungsbeispiele sind die Verbrauchs- und Emissionsbestimmung leichter Nutzfahrzeuge und PKW wie auch die Entwicklung und Auslegung von Energiemanagementsystemen für Hybrid- oder Elektrofahrzeuge.

Die von DEMBSKI am Beispiel hybrid-elektrischer Pkw vorgestellte Methode wurde zudem auf den Müllsammelbetrieb mit schweren Nutzfahrzeugen übertragen und in geeigneter Weise erweitert [Dem05]. In der Erzeugung der Fahrzyklen werden zusätzlich die Fahrbahnsteigung, die im Sammelbetrieb steigende Fahrzeugmasse und die hydraulische Leistungsanforderung des Sammelaufbaus berücksichtigt. Es erfolgt eine Klassierung der Streckentypen anhand der typischen Betriebsmodi (z.B. leere Anfahrt, Sammelbetrieb, volle Rückfahrt). Den zugehörigen Mikrotrips werden ergänzend die zeitlich korrespondierenden Steigungswerte zugeordnet. Daraus ergibt sich nach dem Zusammensetzen der Mikrotrips ein vollständiges Steigungsprofil. Zudem werden Mikrotrips bzw. Lastmuster für die hydraulischen Antriebe aus den zugrunde liegenden Messdaten extrahiert. Im Sammelbetrieb ergibt sich aus der im Zyklus aufzunehmenden Gesamtmasse die Anzahl der einzelnen Sammelvorgänge. Diese Informationen bilden die Grundlage zur Auswahl der Mikrotrips für die hydraulische Leistung.

SCHWARZER und GHORBANI stellen einen in Teilen alternativen Ansatz vor [Sch13]. Sie teilen eine vorhandene Datenbasis zunächst in fünf Streckentypen anhand der Straßentopologie ein. Je Streckentyp erfolgt eine weitere Unterteilung in Mikrotrips. Es wird angenommen, dass diese jeweils aus den Phasen konstante Beschleunigung, Fahren mit instationärer Geschwindigkeit, konstante Verzögerung und Stillstand bestehen. Für den Fahrtanteil wird der instationäre Geschwindigkeitsverlauf durch drei überlagerten Sinusschwingungen unterschiedlicher Amplitude, Frequenz und Phase angenähert. Für jeden beschreibenden Parameter wird aus der Datenbasis eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt, die zur zufälligen Erzeugung von Mikrotrips und darauf aufbauend vollständigen Fahrzyklen genutzt wird.

Abschließend sei auf den Ansatz von PERHINSCHI et al. verwiesen [Per11]. Für die Verbrauchssimulation von Bussen werden über einen Evolutionsalgorithmus Mikrotrips zur Annäherung an Nutzervorgaben für den Gesamtzyklus (z. B. Durchschnittsgeschwindigkeit oder Stopps pro Strecke) neu kombiniert. Die Mikrotrips werden aus existierenden Zyklen extrahiert. Beim Erzeugen des Zyklus wird die Reihenfolge der Mikrotrips als unerheblich angenommen. Die Steigung wird im Zyklus nicht berücksichtigt.

2.6 Fazit

In den vorhergehenden Kapiteln sind unterschiedliche standardisierte Einsatzbeschreibungen und Methoden zur Erzeugung einsatzindividueller Fahrzyklen vorgestellt. Hinsichtlich der Einsatzindividualität, d.h. der Möglichkeit zur Abbildung beliebiger Einsatzprofile einer Fahrzeugklasse, sind standardisierte Einsatzbeschreibungen in der Regel nicht geeignet. Es besteht in den überwiegenden Fällen eine Abweichung zwischen dem standardisierten und dem realen Einsatz. Dies betrifft exemplarisch die Anteile spezifischer Streckenarten an der Gesamtstrecke, deren absolute Länge und Reihenfolge, vorkommende Pausen oder einem variablen Verlauf der Zuladungsmasse über einer Fahrt. In VECTO wird versucht, diesem Umstand über die Definition mehrerer Zyklen zu begegnen. Aber auch in diesem Fall sind je Fahrzeugklasse lediglich 1-2 Zyklen vorgesehen.

Auch weisen die vorgestellten Methoden zur Erzeugung einsatzindividueller Fahrzyklen und Einsatzbeschreibungen Schwachstellen und Lücken auf. So ist es mit teils erheblichen Aufwand verbunden, für jeden einsatzindividuell zu erzeugenden Fahrzyklus zunächst separate Messungen durchzuführen. Bei zu geringem Messumfang besteht die Gefahr, dass sich stochastisch aufgetretene und irreguläre Effekte - wie Staus an Baustellen oder Unfällen - auf den Zyklus auswirken und dieser folglich vom eigentlich durchschnittlichen Einsatz abweicht. Ebenso können spezifische Einflüsse bzw. Bedienverhalten einzelner Fahrer in den Zyklus einfließen und diesen gegenüber einem über verschiedene Fahrer gemittelten Zyklus verfälschen.

Wird hingegen auf eine einsatzbezogen klassierte größere Datenbasis zurückgegriffen, so beziehen sich Sollvorgaben zur Erzeugung der Fahrzyklen häufig nur auf eine Gesamtlänge, Anteile der Streckenarten an dieser oder Stopps pro Strecke. Eine definierte Abfolge der Streckenarten in Kombination mit einer variablen Zuladungsmasse wird demgegenüber nicht oder nur selten vorgegeben. Damit lassen sich spezifische Fahrzeugeinsätze nicht realitätsnah nachbilden, wie das folgende Beispiel eines Verteilerverkehrs verdeutlicht. Ein Fahrzeug fährt zunächst voll beladen vom Depot über eine Autobahn ins Verteilergebiet. Dort folgen Abschnitte innerorts oder auf Landstraßen und die Zuladung nimmt über Entladevorgänge sukzessive ab. Während des Verteilens wird das Einsatzgebiet über eine Autobahn gewechselt, bevor das leere Fahrzeug in das Depot zurückkehrt. Eine entsprechende Abfolge kann über reine Anteile der jeweiligen Klassen und damit auch über einen gewichteten Zyklus nicht abgebildet werden. In diesem Zusammenhang sind Composite-Zyklen besser geeignet, insbesondere wenn bei technischen Systemen mit Möglichkeit zur begrenzten Energiespeicherung - wie es bei der Bremsenergierückgewinnung der Fall ist - der Verlauf des Ladezustands über der Fahrt relevant ist.

Ob die Erzeugung des Fahrzyklus stochastisch oder deterministisch erfolgt ist irrelevant, sofern für eine Bewertung und Analyse oder für Vergleiche von Fahrzeugen immer der identische Zyklus verwendet wird. Lediglich wenn für diese Zwecke zwei wiederholt stochastisch erzeugte und damit leicht variierende Zyklen verwendet werden, treten zwischen den Zyklen abweichende Ergebnisse auf.

Tabelle 2.3: Übersicht der vorgestellten Einsatzbeschreibungen

	Ansätze und Zyklen für Pkw und Nfz		Ansätze und Zyklen für mobile Maschi- nen
	Geschwindigkeit ohne Steigung	Geschwindigkeit mit Steigung	
Standardisierte Zyklen			
Zeitbasiert	NEFZ, WLTP, FIGE, SORT		DLG-PowerMix
Wegbasiert		VECTO	
Aufgaben- beschreibung		lastauto omnibus, VerkehrsRundschau	VDI-2198, Linde, Liebherr
Deterministische Ansätze			
Zeitbasiert	[Fei97], [Par13], [Zou04], [Gal14], [And04]	[Ben15]	[Dei09]
Wegbasiert	[Bru00]	[Süß15], [Koh05], [Böh13], [Eng14], [Mas15]	
Statistikbasiert		[Mül02], [Jan07], [Fug10], [Wei14]	[Bau14], [Fil05]
Betriebspunkte			[Fle13]
Stochastische Ansätze			
Zeitbasiert	[Gon11], [Bal15], [Joh05], [Sch13], [Dem02], [Per11]	[Dem05]	

Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht bezüglich Art und Inhalt der vorgestellten Ansätze und Zyklen. Auffallend ist, dass bei einer kombinierten Geschwindigkeits- und Steigungsvorgabe wegbasierte und bei einer reinen Geschwindigkeitsvorgabe zeitbasierte Ansätze überwiegen.

Dies liegt nahe, da sich bei einer kombinierten zeitbasierten Vorgabe von Geschwindigkeit und Steigung Effekte der Untermotorisierung wesentlich stärker auf die Befahrbarkeit von Zyklen auswirken als bei reiner Geschwindigkeitsvorgabe. Um die Befahrbarkeit von Zyklen zu gewährleisten ist aus diesem Grund in einigen Ansätzen explizit eine Prüfung und einmalige Anpassung der Soll-Geschwindigkeit genannt. Bei schweren Nutzfahrzeugen ist in diesem Zusammenhang auch auf die möglicherweise über eine Fahrt stark variierende Gesamtmasse des Fahr-

zeugs zu verweisen, die eine Adaption der zeitbasierten Geschwindigkeitsverläufe bei Volllastabschnitten (wie an Steigungen oder beim Beschleunigen) erschwert. Da im Hinblick auf die Betrachtung eines Bremsenergieerückgewinnungssystems die Masse und die Steigung allerdings einen wesentlichen Einfluss auf die erforderliche Bremsleistung und damit die Energiebilanz haben, müssen diese im Zyklus Berücksichtigung finden.

Bezüglich der Bremsenergieerückgewinnung ist ein weiterer Fokus auf das im Zyklus enthaltene bzw. beschriebene Verzögerungsverhalten zu legen. In den wegbasierten Ansätzen nach [Süß15], [Bru00] oder auch in VECTO werden in den Verzögerungsphasen feste Geschwindigkeitsverläufe statt einer Zielgeschwindigkeit vorgegeben. Um die Auswirkung technischer Maßnahmen, des Fahrers, der Masse oder von Regelstrategien auf das Verzögerungsverhalten und damit die Energiebilanzen betrachten zu können, muss sich die Verzögerung in Abhängigkeit der genannten Größen in der Simulation frei einstellen können.

Bezüglich der inhaltlichen Gestaltung der Einsatzbeschreibung ist bei direkt auf Messdaten basierenden Zyklen zu berücksichtigen, dass die Signalverläufe individuelle Fahrer- und Fahrzeugeinflüsse enthalten, unabhängig von der weg- oder zeitbasierter Vorgabe von Sollwerten. Für objektive Aussagen sind diese Einflüsse aus den gemessenen Daten zu eliminieren, z. B. durch das Aufprägen einer Zielgeschwindigkeit.

Zusammengefasst bestehen Lücken hinsichtlich der Beschreibung und Abbildung beliebiger anwenderspezifischer Einsatzprofile schwerer Nutzfahrzeuge durch geeignete einsatzindividuelle Fahrzyklen. Die Fahrzyklen müssen zur Nachbildung realistischer Fahrtabläufe geeignet sein und neben der Geschwindigkeits- und Steigungsvorgabe das Aufprägen einer über der Fahrt variablen Zuladungsmasse ermöglichen. Die Vorgabe der Sollgrößen ist derart zu gestalten, dass die Fahrzyklen zur Gewährleistung aussagekräftiger Ergebnisse fahrzeugunabhängig gültig sind und eine automatische Adaption an unterschiedliche Fahrzeugparameter möglich ist. Im weiteren Verlauf wird ein entsprechender Lösungsansatz vorgestellt.

3 Entwickelte Methode zur einsatzindividuellen Bewertung

3.1 Zielsetzung und Lösungsansatz

Wie einleitend beschrieben hängen die erreichbaren Energie- und Kraftstoffeinsparungen für viele technische Maßnahmen stark vom anwenderspezifischen Einsatzprofil eines Fahrzeugs ab. Dies trifft auch auf die Bremsenergierückgewinnung am Kühlsattelaufleger zu, die im Rahmen dieser Arbeit als Anwendungsbeispiel dient. Die simulationsgestützte anwendergerechte Auslegung oder Konfiguration eines entsprechenden Fahrzeugs erfordert somit Fahrzyklen zur hinreichend genauen Abbildung realer Fahrzeugeinsätze. Vor diesem Hintergrund wurde eine Methode erarbeitet, mit der sich beliebige und individuelle Fahrzeugeinsätze schwerer Nutzfahrzeuge im Straßengütertransport formal beschreiben lassen und mit der korrespondierende Fahrzyklen erzeugt werden können. Eine wesentliche Anforderung an die Fahrzyklen ist die Adaptierbarkeit an unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten und Vergleiche zu ermöglichen.

Zur Unterstützung einer anwendergerechten Auslegung und Konfiguration von Fahrzeugen hinsichtlich energetischer Aspekte ist das Anwendungsgebiet der Methode im Wesentlichen in der Produktentwicklung zu sehen. Das Potential technischer Lösungen kann auf einfache Weise für beliebige Einsatzprofile ermittelt und verglichen werden, um Komponenten- und Systemlösungen abzuleiten und zu dimensionieren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt unter Anwendung der Methode eine Potentialabschätzung der Bremsenergierückgewinnung am Kühlsattelaufleger für exemplarische Einsatzprofile. Aufbauend auf einer Ableitung von Energiebilanzen werden die Grundlagen zu einer anwender- und einsatzgerechten Systemauslegung geschaffen. Ferner ist eine Anwendung der Methode im Produktmanagement oder Vertrieb eines Herstellers denkbar, um für einzelne Fahrzeugbetreiber und deren individuelle Einsatzprofile das Einsatzpotential technischer Maßnahmen zu bewerten und darauf aufbauend das passende Fahrzeug konfigurieren und anbieten zu können.

Aus der genannten Zielstellung und unter Einbeziehung des Stands der Technik resultieren folgende Anforderungen an den Lösungsansatz. Zunächst müssen sich beliebige realistische und individuelle Einsatzprofile und Fahrten abbilden und in Form eines Fahrzyklus beschreiben lassen. Dies bezieht sich sowohl auf die Gesamtlänge einer Fahrt als auch auf die Reihenfolge, Länge und Art befahrener Streckenabschnitte. Den Streckenabschnitten, im Folgenden auch Segmente genannt, müssen darüber hinaus Eigenschaften zur Topographie und Verkehrsdichte zugewiesen werden können. Des Weiteren gehören einsatzspezifische Beladungsvorgänge, ein daraus resultierender Verlauf der Zuladung über der Strecke sowie Pausen und Wartezeiten zu einer realen Fahrt und sind in der Beschreibung des Einsatzprofils und im Fahrzyklus zu berücksichtigen. Unter Einbeziehung dieser Punkte können beliebige Einsatzprofile vom Verteiler- bis zum Fernverkehr mit regionalen und anwenderspezifischen Ausprägungen beschrieben werden.

Als weitere Anforderung soll die Methode nicht auf einsatzindividuell durchzuführenden Messfahrten beruhen. Ziel ist die Minimierung des Aufwands zur Erzeugung eines einzelnen Fahrzyklus. Stattdessen ist zur Erzeugung der Fahrzyklen auf eine Datenbasis zurückzugreifen, die auf einmalig durchgeführten einsatzunabhängigen Messungen und einer statistischen Auswertung sowie Klassierung der gewonnen Messdaten beruht.

Für objektive Ergebnisse und aussagekräftige Vergleiche unterschiedlicher Fahrzeuge müssen das Einsatzprofil, die Fahrzyklen und die Datenbasis für die gegebene Fahrzeugklasse der schweren Nutzfahrzeuge im Gütertransport sowohl fahrzeug- als auch fahrerunabhängig gestaltet und gültig sein. Sie dürfen weder Eigenschaften eines bestimmten Fahrzeugs noch eines spezifischen Fahrertyps enthalten. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten, die stark von Fahrzeugeigenschaften und dem Verhalten des Fahrers beeinflusst werden. Bei der Datenauswertung zum Aufbau der Datenbasis sind entsprechende Einflüsse zu erkennen und herauszufiltern.

Die angestrebte allgemeine Anwendbarkeit der Fahrzyklen auf schwere Nutzfahrzeuge bedingt automatisch eine Adaptionfähigkeit des Fahrzyklus. Weil im Fahrzyklus konkrete Vorgaben zu Geschwindigkeitsverläufen beim Beschleunigen, an Steigungen oder Gefällen und bei Verzögerungsvorgängen nicht enthalten sind, können sich diese Verläufe frei in Abhängigkeit und im Zusammenspiel von Fahrzeugeigenschaften, der Beladung und dem Verhalten des Fahrers einstellen. Im Umkehrschluss bedingt dies für eine simulationsbasierte Bewertung eine geeignete Modellierung des Fahrzeugs und Fahrerverhaltens (vgl. Kapitel 3.4).

Ebenfalls aus der allgemeinen Anwendbarkeit heraus sind die Fahrzyklen synthetisch zu gestalten und sollen weder teilweise noch vollständig gemessene Signalverläufe als Sollvorgabe enthalten. Da allerdings eine synthetische Sollvorgabe im Vergleich zu gemessenen Signalen häufig weniger dynamisch ist (bspw. durch nicht berücksichtigte geringfügige Geschwindigkeitsschwankungen bei Konstantfahrt), ist mit dem Fokus auf der Bremsenergierückgewinnung ein besonderes Augenmerk auf Verzögerungsvorgänge zu legen.

Mit der beschriebenen Zielsetzung und den genannten Anforderungen wurde der in Bild 3.1 gezeigte Lösungsansatz erarbeitet (vgl. auch [Dop14]). Im ersten Schritt sind Informationen zum zu betrachtenden Fahrzeugeinsatz in die standardisierte Beschreibungsform des Einsatzprofils zu überführen. Diese Informationen können als allgemeines Wissen zum Fahrzeugbetrieb vorhanden sein, aus Telematik- oder Dispositionsdaten abgeleitet, in Gesprächen mit Flotten- und Fahrzeugbetreibern ermittelt oder synthetisch erzeugt werden. Das Einsatzprofil im Sinne des Ansatzes enthält u.a. Informationen zur Länge einer Fahrt, zur Zusammensetzung der genutzten Streckenarten, zur Topographie der Strecke sowie zu Be- und Entladevorgängen und damit dem Verlauf der Zuladungsmasse über einer Fahrt.

Die Informationen des Einsatzprofils dienen im nächsten Schritt in Kombination mit einer fest hinterlegten Datenbasis der Erzeugung eines einsatzindividuellen Fahrzyklus, der den im Einsatzprofil beschriebenen Fahrzeugeinsatz widerspiegelt. Der Fahrzyklus gibt in Abhängigkeit

der Streckenart und Topographie eine Zielgeschwindigkeit und ein Steigungsprofil über dem Weg vor. Kurzfristige Verzögerungs- und Haltevorgänge sowie die über das Einsatzprofil definierten Ladevorgänge gehen über zusätzliche Events in den Fahrzyklus ein.

Die hinterlegte Datenbasis enthält u.a. notwendige Kennwerte und Informationen zur statistischen Verteilung von der Zielgeschwindigkeiten und Steigungswerten bei unterschiedlichen Streckenarten und Topographien, aus denen sich die synthetischen Zielgeschwindigkeits- und Steigungsprofile des Fahrzyklus generieren lassen. Grundlage der Datenbasis ist wiederum die Auswertung einsatzunabhängig durchgeführter Messfahrten und die Klassierung der entsprechenden Ergebnisse. Auf diese Weise ist mit Vorliegen der Datenbasis die Erzeugung von Fahrzyklen ohne Durchführung ergänzender Messfahrten möglich.

Zur Ermittlung der angestrebten Ergebnisse und Bewertungskriterien kommt abschließend die Methode der Simulation zur Anwendung. In die Simulation geht der Fahrzyklus als Sollvorgabe ein, die durch ein hinterlegtes und parametrisiertes Fahrzeug- und Fahrermodell umzusetzen ist. Das auf diese Weise gewonnene Ergebnis ist für das parametrisierte und modellierte Fahrzeug im beschriebenen Einsatz gültig.

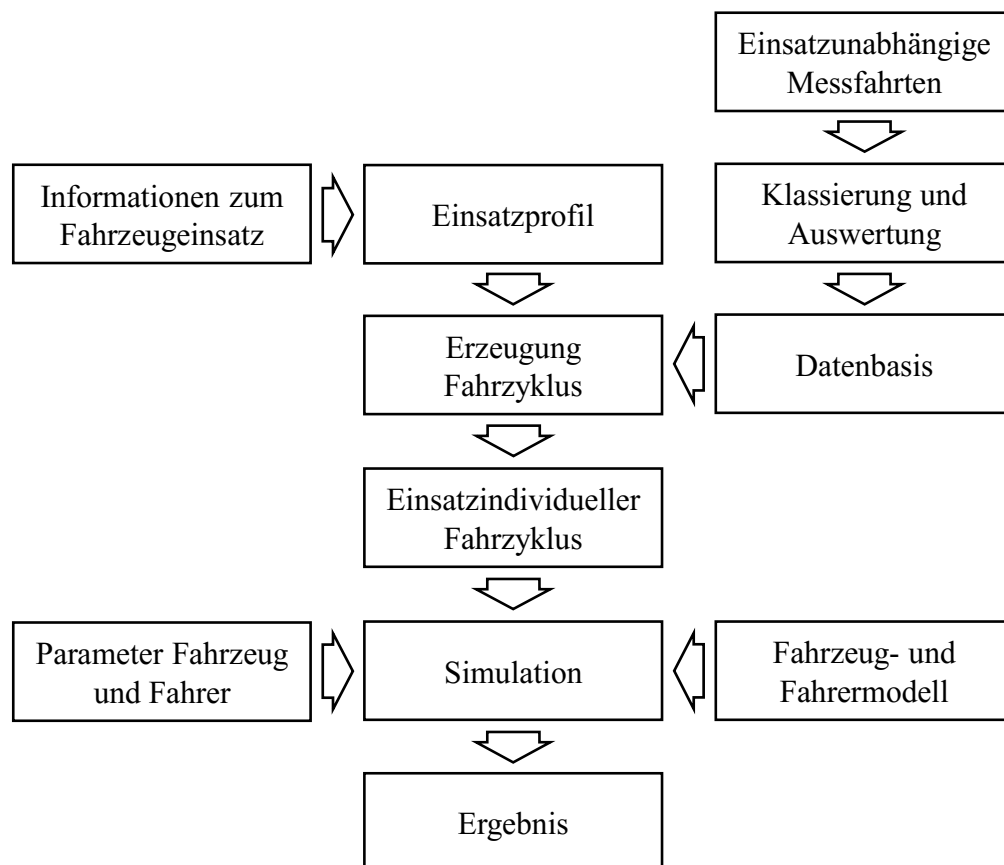


Bild 3.1: Entwickelter Bewertungsansatz auf Basis einsatzindividuell erzeugter Fahrzyklen

In der vorliegenden Arbeit werden für die Bremsenergieerückgewinnung in Abhängigkeit der installierten Generatorleistung die zurückgewinnbare Energiemenge und die daraus resultierende mittlere elektrische Leistungsabgabe an das Kühlaggregat als Ergebnis bestimmt. Nähere Ausführungen zu den Bewertungskriterien folgen in Kapitel 5. Weitere grundsätzlich mögliche

Ergebnisse und Bewertungskriterien sind - wie in Kapitel 2.3.1 ausgeführt - der absolute Energieverbrauch am Rad, die Bilanz aus zum Antrieb aufgewendeter und beim Bremsen freiwerdender Traktionsenergie oder der absolute Verbrauch an Kraftstoff. Wird der absolute Verbrauch auf die im Einsatzprofil zurückgelegte Strecke oder die Transportleistung in Tonnen-Kilometer bezogen, so kann die Effizienz des Fahrzeugs bestimmt werden. Aufgrund des weg-basierten Zielgeschwindigkeitsansatzes für den Fahrzyklus (vgl. Kapitel 3.3) lassen sich mit dem erarbeiteten Ansatz auch der Zeitbedarf zum Befahren des Zyklus und damit die Produktivität ermitteln.

In das Ergebnis fließen der Fahrzeugeinsatz, das Fahrzeug und das Fahrverhalten des Fahrers ein. Damit weist der Ansatz Parallelen zur 3F-Methode für schwere Nutzfahrzeuge von WEILER auf (vgl. Kapitel 2.5.1 und [Wei14]). In Abgrenzung zur 3F-Methode lassen sich jedoch beliebige Fahrzeugeinsätze mit regionalen (Topographie, Verkehrsdichte) und insbesondere einsatzspezifischen (Anzahl Be- und Entladevorgänge, Verlauf der Zuladungsmasse, Pausen, Wartezeiten) Ausprägungen in einem zusammengesetzten Fahrzyklus nachbilden. Eine der Simulation nachgeschaltete Gewichtung von Ergebnissen ist somit nicht erforderlich. Das definierte Einsatzprofil weist inhaltlich zudem Schnittmengen mit dem von KOHRS [Koh05] definierten Einsatzprofil auf. Der wesentliche Unterschied ist auch hier, dass sich das Einsatzprofil nach KOHRS aus einer anhand der Strecke prozentual gewichteten Kombination von Teilelementen ergibt. Allerdings berücksichtigt KOHRS in seinem Einsatzprofil den Umstand, dass ein Nutzfahrzeug über seine Einsatzdauer in verschiedenen Kombinationen mit oder ohne Anhänger betrieben werden kann. Demgegenüber ist das im Rahmen dieser Arbeit definierte Einsatzprofil nur für eine feste Fahrzeugkombination gültig. Das An- oder Abkuppeln unterschiedlicher Sattelaufleger und Anhänger ist nicht berücksichtigt.

Auch wenn das Einsatzprofil die realitätsnahe Nachbildung einer Einzelfahrt mit deren Streckenarten und topographischen Eigenschaften ermöglicht, darf der darauf aufbauend erzeugte Fahrzyklus nicht als Abbild eines einsatzindividuell gemessenen Geschwindigkeits- oder Steigungsprofils verstanden werden. Da zur Erzeugung des Fahrzyklus auf eine klassierte Datenbasis zurückgegriffen wird, handelt es sich beim Fahrzyklus und den damit ermittelten Ergebnissen um typische durchschnittliche Werte, die von denen einer Einzelfahrt abweichen können. In [Süß15] wurde allerdings eine weitreichende Übereinstimmung von Simulationsergebnissen gezeigt, die mit einem auf einsatzindividuellen Messungen basierendem Fahrzyklus und mit dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansatz erzeugt wurden.

Detaillierte Ausführungen zum Aufbau und Inhalt des Einsatzprofils und der Fahrzyklen sind in Kapitel 3.2 und 3.3 enthalten. Spezifische aus dem Lösungsansatz resultierende Anforderungen an die Simulation und das Simulationsmodell werden in Kapitel 3.4 aufgeführt. Das Vorgehen zur Gewinnung der Datenbasis und zur Erzeugung der Fahrzyklen ist als zentraler Bestandteil separat in Kapitel 4 beschrieben. Abschließend erfolgt in Kapitel 5 die Validierung und Anwendung des Lösungsansatzes am Beispiel der Bremsenergierückgewinnung.

3.2 Inhalt und Aufbau des Einsatzprofils

Das Einsatzprofil ist eine fahrzeugunabhängige und formale Beschreibungsform für den betrachteten Einsatz und bildet zusammen mit der Datenbasis die Grundlage zur Erzeugung des Fahrzyklus. Die Beschreibung erfolgt entweder grafisch oder matrixbasiert. Zur Abbildung beliebiger anwenderspezifischer Einsätze wurden im vorangegangenen Kapitel folgende Anforderungen an das Einsatzprofil gestellt. Zum einen müssen sich je Fahrt deren Länge, die befahrenen Streckenarten, deren Reihenfolge und verschiedene regionale Einsatzbedingungen, wie die Topographie und Verkehrsdichte, berücksichtigen lassen. Zum anderen sind neben dem reinen Fahrbetrieb einsatzspezifische Be- bzw. Entladevorgängen und damit ein variabler Verlauf der Zuladung sowie Pausen und Wartezeiten einzubeziehen. Mit einer ergänzenden Angabe der Schichten pro Tag und Einsatztage pro Jahr lässt sich die Jahresfahrleistung im Einsatzprofil berechnen.

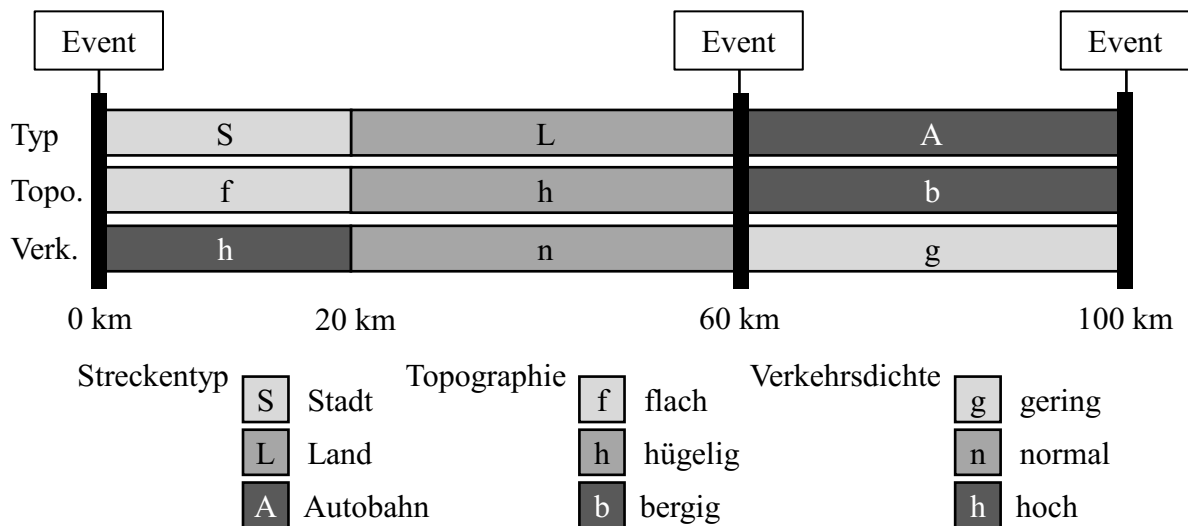


Bild 3.2: Exemplarisches und vereinfachtes Einsatzprofil mit hinterlegten Klassen

Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurde ein Ansatz erarbeitet, der auf einer begrenzten Anzahl beliebig kombinierbarer Klassen für den Streckentyp, die Topographie und die Verkehrsdichte basiert. Die Klasse *Streckentyp* besitzt im Rahmen dieser Arbeit die Ausprägungen Stadt, Land und Autobahn, die Klasse *Topographie* die Ausprägungen flach, hügelig und bergig und die Klasse *Verkehrsdichte* die Ausprägungen gering, normal und hoch (vgl. auch Bild 3.2). Zur Beschreibung des Fahrzeugeinsatzes wird die pro Tag bzw. Schicht zurückgelegte Fahrstrecke in Segmente unterteilt und jedem Segment eine beliebige Kombination der drei Klassen zugeordnet. Zwischen zwei Segmenten und damit an einer definierten Streckenposition kann jeweils ein Be-/Entladevorgang, ein Wartevorgang oder eine Pause liegen. Entsprechende Haltvorgänge werden im weiteren Verlauf allgemein als Event bezeichnet. Zusätzlich befindet sich immer jeweils ein Haltvorgang und damit Event am Beginn und Ende des Einsatzprofils.

Bild 3.2 verdeutlicht dies grafisch an einem vereinfachten Einsatzprofil. Das exemplarische Einsatzprofil mit einer Fahrtlänge von 100 km besteht aus drei Segmenten, einem Event bei 60 km und den beiden Events am Beginn und Ende. Das erste Segment ist ein 20 km langer

Abschnitt innerorts (Stadt) bei flacher Topographie und hoher Verkehrsdichte. Darauf folgt ein 40 km langer Landstraßen-Abschnitt bei hügeliger Topographie und normaler Verkehrsdichte an. Den Abschluss bildet ein bergiger Autobahn-Abschnitt bei geringer Verkehrsdichte.

Tabelle 3.1: Daten zur Charakterisierung der Events und der Zuladung

Streckenposition	s_E	km	Masse der Ladung	m_L	t
Zeitliche Dauer	d_E	min	Schwerpunkt horizontal	SP_h	m
Geschwindigkeit ²	v_E	km/h	Schwerpunkt vertikal	SP_v	m

Jedes Event hat darüber hinaus weitere und zur vollständigen Beschreibung des Fahrzeugeinsatzes notwendig Eigenschaften. Diese sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Neben der Streckenposition besitzen die Events eine zeitliche Dauer. Bei den im Einsatzprofil vorgegebenen Events handelt es sich um Be-/Entladevorgänge oder Pausen, während denen die Fahrgeschwindigkeit zwangsläufig Null ist. Die Angaben zur geladenen Masse beziehen sich jeweils auf das Ende eines Events. Das folgende Fahrsegment wird folglich mit dieser Masse befahren. Die Schwerpunktlage der Ladung ist relativ zum Ladungsträger, in diesem Fall dem Sattelaufleger, vorgegeben (horizontal: hinter der Stirnwand; vertikal: oberhalb der Ladefläche). Sie ist für die Berechnung der Achslasten und des Rollwiderstands je Achse erforderlich. Ändert sich der Ladungszustand im Vergleich zum vorherigen Event nicht, handelt es sich um eine reine Pause bzw. einen Wartevorgang mit definierter Dauer.

Bild 3.3 verdeutlicht die Vorgaben am Beispiel zweier realitätsnaher Einsatzprofile für einen Verteiler- und Fernverkehr. Auf die Angabe der Sollgeschwindigkeit und Schwerpunktlage je Event wurde der Übersicht halber verzichtet. Das exemplarische Einsatzprofil für den urbanen Verteilerverkehr (oben) hat eine Fahrtlänge je Schicht von 130 km. Daraus ergibt sich im 2-Schicht-Betrieb bei 245 Einsatztagen im Jahr eine Jahresfahrleistung von 63.700 km. Das Einsatzprofil beginnt mit einem Autobahnanteil für die Anfahrt von einem außerhalb gelegenen Depot in die zu beliefernde Stadt. Daran schließen sich in der Stadt vier Entladevorgänge an, bevor über einen Autobahnabschnitt das Auslieferungsgebiet gewechselt wird. Nach weiteren vier Entladevorgängen folgt zuletzt die Rückfahrt ins Depot. Wie in den Events zu erkennen nimmt die geladene Masse bis zum letzten Entladevorgang bis auf null ab, sodass die Rückfahrt leer erfolgt. Die Topographie ist flach bis hügelig und die Verkehrsdichte normal bis hoch.

Das Einsatzprofil für den Fernverkehr (unten) weist eine Jahresfahrleistung von 134.750 km auf. Die Beladung ist bis zum Fahrtende konstant, lediglich zur Hälfte ist eine Pause von 45 Minuten vorhanden. Die Fahrt erfolgt überwiegend auf Autobahnen mit einem geringen Anteil Stadt und Landstraße zum Fahrtbeginn und -ende. Die Topographie ist flach mit hügeligen Anteilen und einem kurzen bergigen Segment, die Verkehrsdichte ist gering bis normal.

² Bei Be- und Entladevorgängen sowie Pausen und Wartezeiten immer Null

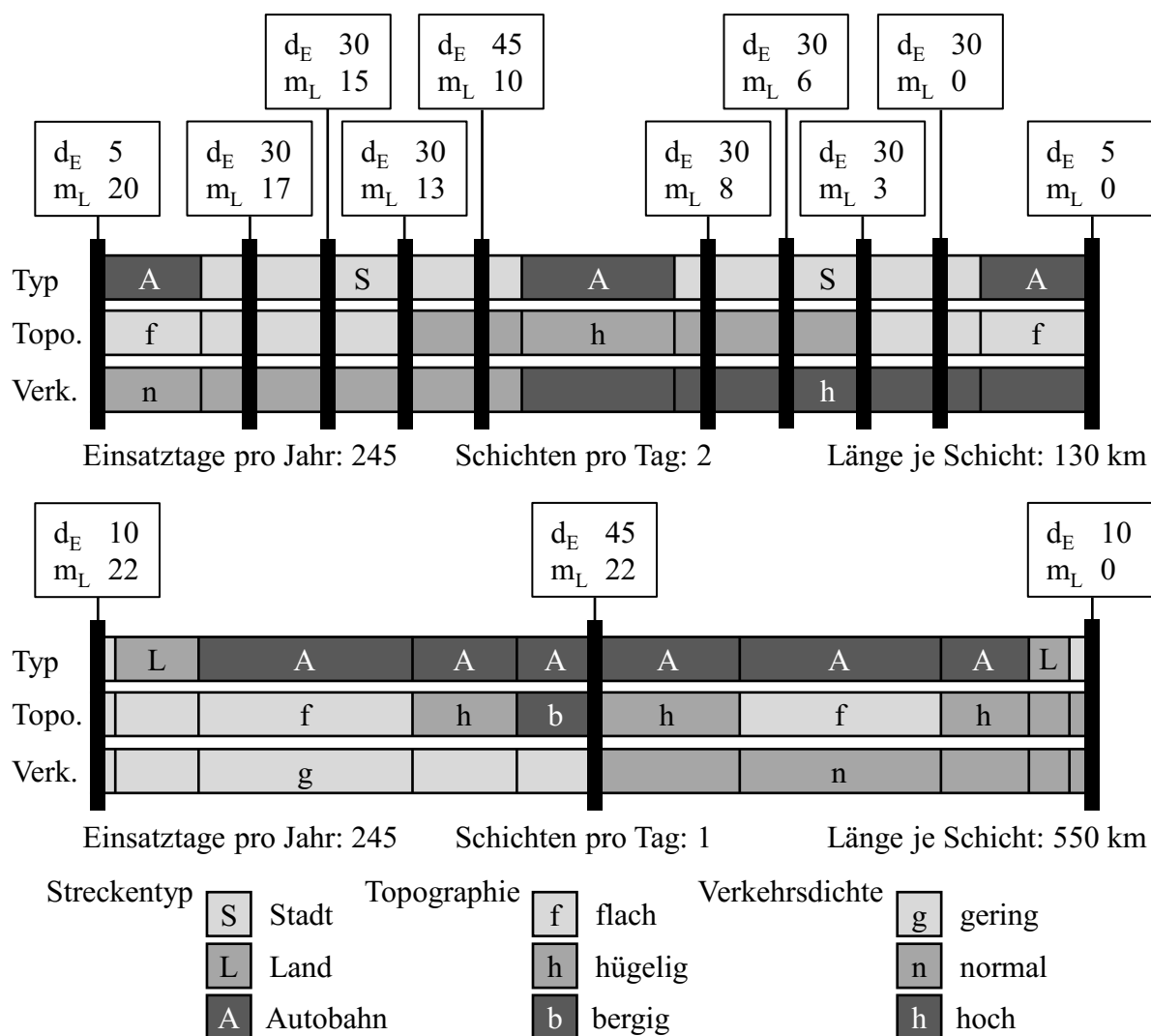


Bild 3.3: Realitätsnahe Einsatzprofile für einen exemplarischen Fahrzeugeinsatz im Verteilerverkehr (oben) und Fernverkehr (unten)

Parallel zur grafischen Darstellung können Einsatzprofile auch formal in Matrixform beschrieben werden. Dazu wird jedem Streckentyp, jeder Topographie und jeder Verkehrsdichte ein Parameterwert zugeordnet, der die Klasseneigenschaft repräsentiert (vgl. Tabelle 3.2). Jede Zeile der matrixbasierten Beschreibungsform repräsentiert ein Segment oder Event des Einsatzprofils. Die Reihenfolge der Zeilen entspricht der chronologischen Abfolge der Segmente und Events über der Strecke.

Tabelle 3.2: Parameterwerte der Klassen des Einsatzprofils

Streckentyp	Wert	Topographie	Wert	Verkehrsdichte	Wert
Stadt	1	flach	1	niedrig	1
Land	2	hügelig	2	normal	2
Autobahn	3	bergig	3	hoch	3
Event	4				

Die erste Spalte jeder Zeile bezeichnet über den Parameterwert den Streckentyp. Für Fahrsegmente stehen die Werte „1“ bis „3“ und für ein Event der Wert „4“. Der Inhalt der folgenden Spalten ergibt sich differenziert nach dieser Unterteilung. Die Spalten 5 und 6 sind nur für Events spezifiziert, für Fahrsegmente werden sie nicht benötigt. Tabelle 3.3 verdeutlicht die matrixbasierte Darstellungsweise am Beispiel des Fernverkehrs nach Bild 3.3.

Tabelle 3.3: Matrixbasierte Darstellung des Einsatzprofils Fernverkehr nach Bild 3.3

Strecken- typ/Event	Länge	Topo.	VD*)			Erläuterung
	d_E	v_E	m_L	SP_h	SP_v	
4	10	0	22	6,8	1	Event: 10min, 0km/h, 22t
1	5	1	1			Stadt: 5km, flach, VD gering
2	50	1	1			Land: 50km, flach, VD gering
3	120	1	1			Autob.: 120km, flach, VD gering
3	60	2	1			Autob.: 60km, hügelig, VD gering
3	40	3	1			Autob.: 40km, bergig, VD gering
4	45	0	22	6,8	1	Event: 45min, 0km/h, 22t
3	80	2	2			Autob.: 80km, hügelig, VD normal
3	110	1	2			Autob.: 110km, flach, VD normal
3	50	2	2			Autob.: 50km, hügelig, VD normal
2	30	2	2			Land: 30km, hügelig, VD normal
1	5	2	2			Stadt: 5km, hügelig, VD normal
4	10	0	0	6,8	1	Event: 10min, 0km/h, 0t

*) VD: Verkehrsdichte

Das erste Segment des beispielhaften Einsatzprofils und folglich auch die erste Zeile der Matrix entsprechen einem Event mit den zugehörigen Werten für die Dauer, Geschwindigkeit und Ladungsmasse. Der Schwerpunkt der Ladung liegt 6,8 m hinter der Stirnwand des Trailers und 1 m oberhalb der Ladefläche. Analog zur grafischen Darstellung schließt sich ein Fahrsegment des Typs *Stadt* (Wert der ersten Spalte = 1) mit einer Länge von 5 km bei flacher Topographie (Spalte Topo. = 1) und geringer Verkehrsdichte (Spalte Verkehr = 1) an. Darauf folgen ein Landstraßen- und drei Autobahn-Segmente. Die Position eines Events ergibt sich jeweils aus der Länge aller vorangegangenen Fahrsegmente. Damit liegt das zweite Event an der Position 275 km. Es hat eine Dauer von 45 Minuten und die Beladungssituation ändert sich im Vergleich zum vorangegangenen Event nicht, womit es sich um eine reine Pause handelt. Anschließend folgen weitere Fahrsegmente und das letzte Event.

Auf diese Weise lassen sich Einsatzprofile grafisch und matrixbasiert beschreiben. Die matrixbasierte Form kann zur automatisierten Erzeugung von Fahrzyklen auf Basis der Einsatzprofilbeschreibung verwendet werden.

3.3 Realisierungsform der Fahrzyklen

Der Vergleich unterschiedlicher Fahrzeugkonfigurationen für ein gegebenes Einsatzprofil führt nur dann zu aussagekräftigen Ergebnissen, wenn die Fahrzyklen weder Fahrzeug- noch Fahreigenschaften enthalten. Sie müssen für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen gleichermaßen gültig und anwendbar sein. Diese Adaptionsfähigkeit an veränderliche Fahrzeugparameter und eine variable Beladung ist eine zentrale Anforderung. Die Fahrzyklen müssen zudem aus der Einsatzprofilbeschreibung unter Berücksichtigung der definierten Klassen automatisiert ableitbar sein. Aufgrund der Adaptierbarkeit der Fahrzyklen an die Beschleunigungs- und Steigfähigkeit eines Fahrzeugs sind zeitbasierte Fahrzyklen nicht geeignet, insbesondere wenn die Zuladung über einer Fahrt variabel ist. Bei direkt auf Messdaten basierenden Fahrzyklen ist zu beachten, dass in den Messdaten Eigenschaften des für die Messung genutzten Fahrzeugs und des Fahrerverhaltens enthalten sind. Sie können nur eingeschränkt zur Simulation eines Fahrzeugs mit einer bspw. abweichenden Eigenmasse oder einer veränderten Antriebsleistung verwendet werden.

Für die auf Basis des Einsatzprofils und einer Datenbasis automatisiert zu erzeugenden Fahrzyklen kommt aus diesen Gründen ein kombinierter weg- und eventbasierter Ansatz zum Einsatz, der im Folgenden beschrieben wird. Auf das Vorgehen zur Ableitung der Datenbasis und zur automatisierten Erzeugung der Fahrzyklen geht ausführlich Kapitel 4 ein. Die synthetischen Fahrzyklen bestehen aus den folgenden über dem Weg vorgegebenen Inhalten.

- Fahrbahnsteigung
- Stationäre Zielgeschwindigkeit
- Events zur Abbildung kurzzeitiger Verzögerungs- und Haltevorgänge während des Fahrbetriebs (ergänzend zu den im Einsatzprofil definierten Be-/Entladevorgängen und Pausen)

Die Fahrbahnsteigung wird gemäß Bild 3.4 als synthetisches, aus Trapezen bestehendes Profil über dem Weg vorgegeben. Auf ein positives Steigungssegment (Steigung größer Null) folgt immer ein negatives, d.h. auf eine Bergfahrt folgt immer eine Gefällstrecke. Wird die trapezförmige Steigungsvorgabe in ein Höhenprofil umgerechnet, so weist das Höhenprofil über dem Weg einen stetigen Verlauf ohne Knicke auf.

Der weitere Fahrzyklus kann als Fahranweisung für ein virtuelles Fahrermodell verstanden werden. Die stationäre Zielgeschwindigkeit wird als Rechteckprofil über dem Weg vorgegeben. Jedes Segment dieses Zielgeschwindigkeitsprofils verfügt über eine definierte Länge und Geschwindigkeit. Das Fahrermodell versucht diese maximal zulässige Geschwindigkeit zu errei-

chen und zu halten. Bei Beschleunigungsvorgängen und an Steigungen treten allerdings Regelabweichungen in Abhängigkeit der Antriebsleistung und der Gesamt- oder Zuladungsmasse des Fahrzeugs auf. Fahrzeuge mit einem ungünstigen Verhältnis der Antriebsleistung zur Masse benötigen zum Beschleunigen oder Befahren einer Steigung länger. Die Ist-Geschwindigkeit bricht stärker ein und die Zielgeschwindigkeit wird später erreicht (vgl. Bild 3.4). Am Ende des Fahrzyklus haben jedoch alle Fahrzeuge die gleiche Strecke zurückgelegt und damit die gleiche Fahraufgabe erfüllt, sodass ein direkter Vergleich der Energie- und Kraftstoffverbräuche oder der zurückgewonnenen Bremsenergiemengen möglich ist.

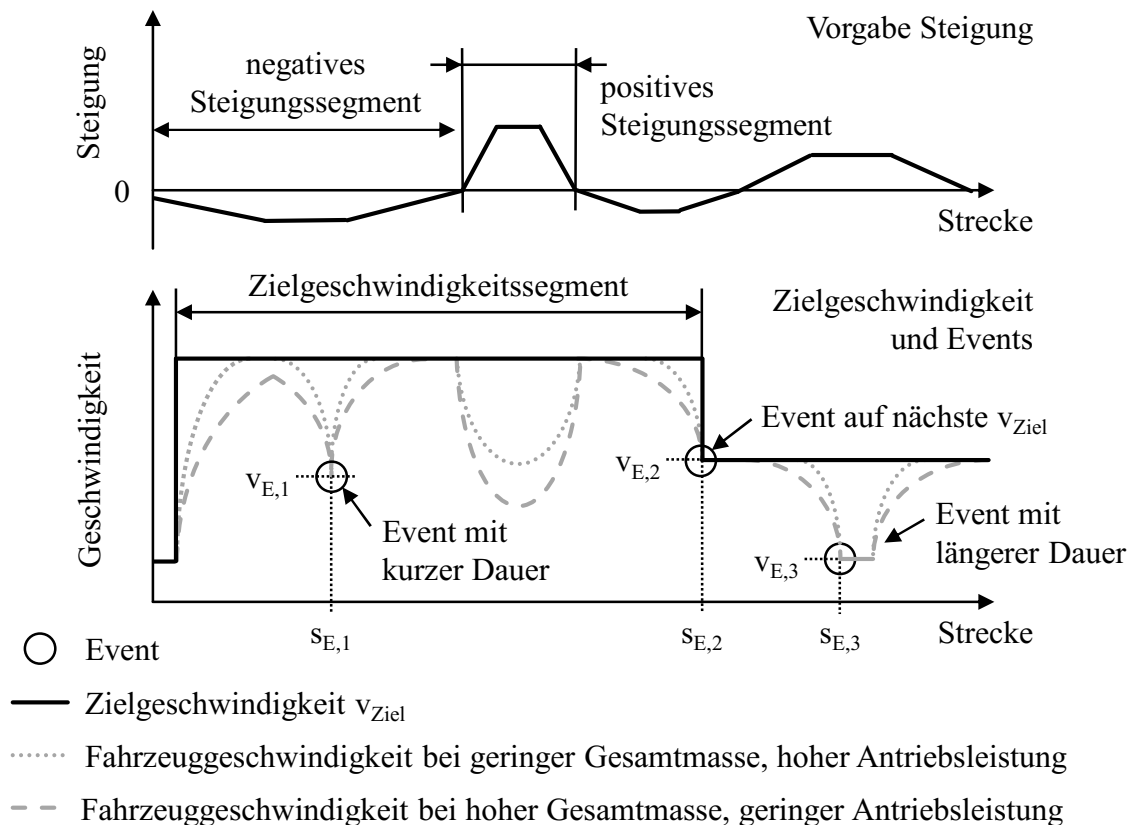


Bild 3.4: Realisierung der weg- und eventbasierten Fahrzyklen inkl. möglicher Geschwindigkeitsverläufe

Zur Abbildung kurzzeitiger verkehrsbedingter Verzögerungs- und Haltevorgänge im eigentlichen Fahrbetrieb sind der stationären Zielgeschwindigkeit weitere wegbasierte Events überlagert. Diese Events werden ergänzend zu den Be-/Entladevorgängen und Pausen des Einsatzprofils vorgegeben und haben identische statistische Eigenschaften (vgl. vgl. Tabelle 3.1). Jedes dieser überlagerten Events ist somit gekennzeichnet durch eine Position, eine zeitliche Dauer und eine Sollgeschwindigkeit, die unterhalb der aktuellen stationären Zielgeschwindigkeit liegt und gleich aber auch größer Null sein kann. Allerdings ändert sich im Vergleich zum jeweils vorherigen Event weder die Zuladungsmasse noch die Schwerpunktlage, da es sich in diesem Fall nicht um Be- bzw. Entladevorgänge, sondern um Verzögerungs- oder Haltevorgänge im Fahrbetrieb handelt. Mögliche Ursachen sind Ampeln, Abbiegevorgänge, das Befahren enger Kurven oder das Auffahren auf vorausfahrende langsamere Fahrzeuge. Für den Fahrzyklus

selbst ist die Ursache dieser Events irrelevant, sofern deren Geschwindigkeit und Dauer statistisch korrekt nachgebildet sind.

Zusätzlich sind die Verringerungen in der stationären Zielgeschwindigkeit als Event berücksichtigt. Auf diese Weise können alle Events, sowohl die im Einsatzprofil definierten Be-/Entladevorgänge und Pausen als auch die kurzzeitigen Verzögerungs- und Haltvorgänge im Fahrbetrieb, durch das Fahrermodell einheitlich behandelt werden. Bei Annäherung an ein beliebiges Event hat das virtuelle Fahrermodell derart zu reagieren, dass an der Position des Events die vorgegebene Geschwindigkeit erreicht und anschließend für die Dauer des Events gehalten wird. Dabei ist es für das Fahrermodell irrelevant, ob es sich um einen längeren Ladevorgang oder lediglich um ein kurzzeitiges Verzögern handelt. Im exemplarischen Fahrzyklus nach Bild 3.4 hat das erste Event eine Geschwindigkeit unterhalb der Zielgeschwindigkeit und eine nur kurze Dauer. Das zweite Event markiert den Beginn einer verringerten Zielgeschwindigkeit, auf die das Fahrermodell zu reagieren hat. In diesem Fall entspricht die Event- der nächsten Zielgeschwindigkeit. Das dritte Event liegt wiederum in einem Fahrsegment unterhalb der Zielgeschwindigkeit und wird zudem über eine längere Dauer gehalten.

Die stationäre Zielgeschwindigkeit ist im gewählten Ansatz analog der Topographie als reine Streckeneigenschaft zu verstehen, die über lokal oder global gültige Geschwindigkeitsbegrenzungen für schwere Nutzfahrzeuge vorgegeben wird. Demgegenüber bilden die Events verkehrsbedingte Effekte im Fahrbetrieb ab, wie z. B. kurzzeitige Verzögerungs- und Haltvorgänge. Durch die voneinander unabhängige Vorgabe beider Inhalte lässt sich für ein gegebenes und unverändertes Zielgeschwindigkeitsprofil die Verkehrsdichte separate beeinflussen bzw. beschreiben, indem bspw. die Anzahl der Events pro Strecke verringert oder erhöht wird. Alternativ und wie u.a. im *Statistical Driver Simulator* der 3F-Umgebung ausgeführt (vgl. [Mül02]) können alle Sollgeschwindigkeitsvorgaben, egal ob streckenbezogen oder verkehrsbedingt, im Zielgeschwindigkeitsprofil zusammengefasst berücksichtigt werden, was allerdings die separate Vorgabe und Berücksichtigung strecken- und verkehrsbedingter Eigenschaften bei der automatischen Erzeugung eines Fahrzyklus komplexer gestaltet.

Zur Erzeugung eines vollständigen Fahrzyklus wird für jedes Segment des Einsatzprofils mit den jeweiligen Vorgaben zur Länge, zum Streckentyp, zur Topographie und zur Verkehrsdichte ein zunächst separater Teilzyklus erzeugt. Dabei wird jeweils das in der Datenbasis hinterlegte statistische Verhalten zur Beschreibung des Zielgeschwindigkeits- und Steigungsverlaufs sowie der Events nachgebildet. Die Teilzyklen werden anschließend anhand der im Einsatzprofil definierten Reihenfolge zum vollständigen Zyklus zusammengefügt. Es handelt sich somit um einen Composite-Zyklus (vgl. Kapitel 2.5), der die Vorgaben und Klassen des Einsatzprofils widerspiegelt.

3.4 Anforderungen an die Modellbildung

Im entwickelten Bewertungsansatz wird der erzeugte weg- und eventbasierte Zyklus direkt zur Simulation des Fahrzeugbetriebs verwendet. Da im Fahrzyklus lediglich Zielgeschwindigkeiten und Events aber keine Vorgaben zu Beschleunigungs- oder Verzögerungsverläufen enthalten sind, erfordert dies ein geeignetes Fahrer- und Fahrzeugmodell. Eine Ergänzung entsprechender Sollverläufe in Präprozessen, wie z. B. in VECTO (vgl. [Luz14]), findet nicht statt. Damit bleibt der Zyklus adaptiv und fahrzeugunabhängig.

Das Gesamtmodell ist als Vorwärtssimulation aufzubauen. Die Drehmomente an den Antrieben und Bremsenrichtungen des Fahrzeugs ergeben sich somit aus den Vorgaben des Fahrermodells, das den übergeordneten Fahrzustand nach den Vorgaben des Zyklus einregelt. Dabei können die Einflüsse von Beladung und Steigung als Störgrößen verstanden werden, die durch das Fahrermodell auszuregeln sind. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf einer energetischen Betrachtung der Bremsenergierückgewinnung. Auswirkungen auf die Systemdynamik und Fahrstabilität werden nicht betrachtet und müssen demnach im Fahrzeugmodell nicht explizit berücksichtigt werden.

Das Fahrermodell hat damit die über den Fahrzyklus definierten Fahranweisungen als Eingang und muss diese in Zusammenspiel mit dem Fahrzeugmodell umsetzen. Mögliche Übergabegrößen an das Fahrzeugmodell sind die Gas- und Bremspedalstellung oder eine Sollvorgabe antreibender und bremsender Drehmomente für Antriebsstrang und Bremsanlage. Beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit und beim Beschleunigen ist eine Realisierung des Fahrermodells als einfacher Zielgeschwindigkeitsregler möglich. Gegebenenfalls kann im Fahrermodell eine Begrenzung der maximalen Fahrzeugbeschleunigung erfolgen, wobei dies für die Bremsenergierückgewinnung von untergeordneter Bedeutung ist. Demgegenüber ist ein besonderes Augenmerk auf Verzögerungsvorgänge vor Events zu legen. Das Fahrermodell muss rechtzeitig und mit einer gewissen Vorausschau vor einem Event verzögern, damit unter Beachtung realistischer Verzögerungswerte und Bremsleistungen die Eventgeschwindigkeit an der Eventposition erreicht wird. Dabei soll das Fahrermodell analog eines realen Fahrers vor dem aktiven Verzögern mittels der Bremsanlage zunächst in eine Rollphase übergehen. Je nach Betriebsstrategie ist während des Rollens der Verbrennungsmotor aus- oder eingekuppelt und die Bremsenergierückgewinnung aktiv oder inaktiv. Das Streckenverhältnis zwischen Rollen und aktivem Verzögern sowie die Länge der Vorausschau kann u.a. zur Charakterisierung sparsamer oder dynamischer Fahrweise herangezogen werden. Zudem sind die Fahrbahnsteigung und Beladung zur Anpassung der Vorausschau und des Fahrerverhaltens zu berücksichtigen.

Das Fahrzeug und dessen Antriebsstrang sind derart zu modellieren, dass sich mit den Vorgaben des Fahrermodells und unter Berücksichtigung von Fahrbahnsteigung und Beladung realitätsnahe Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverläufe einstellen. Diese erfordert eine Modellierung sowohl der Fahrmechanik des Sattelzugs nach Kapitel 2.2.1 als auch des Antriebsstrangs der Zugmaschine bestehend aus Dieselmotor, Getriebe und Schaltstrategie. Seitens des

Dieselmotors sind die statische Volllast- und Schubkennlinie in Abhängigkeit der Drehzahl zu modellieren, die sich aus dem gewählten Gang und der Fahrgeschwindigkeit ergibt. Auf diese Weise können die Fahrleistungsgrenzen im Rahmen dieser Arbeit hinreichend genau berücksichtigt werden.

Mit dem Fokus auf der Bremsenergierückgewinnung ist ein besonderes Augenmerk auf eine valide Nachbildung des Schlepp- bzw. Schubverhaltens des Fahrzeugs und Antriebsstrangs zu legen. Ist der Dieselmotor beim Rollen oder Verzögern eingekuppelt, stehen die im Schubbetrieb durch den Dieselmotor dissipierten Bremsenergiemengen nicht mehr zur Rückgewinnung zur Verfügung. Für die Maximierung der zurückgewinnbaren Energiemengen sind die konventionellen Betriebs- oder Dauerbremseinrichtungen nur zu nutzen, wenn die Sollverzögerung durch das Energierückgewinnungssystem und den Schubbetrieb des Dieselmotors nicht erreicht werden kann. Aufgrund dieser Regelstrategie haben die konventionellen Bremsanlagen keine Auswirkung auf die Energiebilanz. Auf eine detaillierte Modellierung der Systeme kann somit verzichtet werden. Stattdessen ist eine Nachbildung der Generatorkennlinie in Abhängigkeit der Drehzahl bzw. Fahrgeschwindigkeit erforderlich. Damit ist im Modell für jeden Betriebszustand ein Abgleich der Solldrehmomente mit den maximal möglichen Drehmomentwerten durchführbar.

Eine Validierung des Fahrzeugmodells ist somit besonders für die Fahrmechanik und das Schubverhalten des Antriebsstrangs erforderlich, um hinsichtlich der zurückgewinnbaren Bremsenergiemengen valide Aussagen treffen zu können. Die übrigen Modellbestandteile sind im Wesentlichen auf ein grundsätzlich realitätsnahes Verhalten zu überprüfen.

Je nach Zielsetzung der Untersuchung ist eine Erweiterung des Fahrer- und Fahrzeugmodells möglich. Für Verbrauchs- oder Emissionssimulationen seitens der Zugmaschine kann das Motormodell verfeinert und um Nebenantriebe sowie die Abgasnachbehandlung inklusive thermischer Effekte ergänzt werden. Auch effizienzsteigernde Assistenzfunktionen zur optimierten Geschwindigkeits- und Gangwahl ließen sich aufgrund der gewählten Realisierungsform der Fahrzyklen abbilden. Zusätzlich ist eine Erweiterung des Fahrermodells im Zusammenspiel mit dem Fahrzeugmodell möglich, sodass ersteres analog eines realen Fahrers über separate Möglichkeiten zur Beeinflussung der Gangwahl sowie zur Betätigung der Betriebs- und Dauerbremse verfügt. Alle genannten Punkte betreffen allerdings nur das Simulationsmodell. Die grundsätzliche Methode zur Einsatzbeschreibung und der darauf aufbauenden Erzeugung von Fahrzyklen sowie die Gestalt der Zyklen selbst bleiben davon unberührt.

4 Generierung einsatzindividueller Fahrzyklen

Zur Umsetzung der im vorherigen Kapitel definierten Vorgaben und Anforderungen ist ein Ansatz zur automatischen Erzeugung synthetischer Fahrzyklen auf Basis der entwickelten Einsatzprofilbeschreibung und einer hinterlegten Datenbasis erforderlich. Im Folgenden wird zunächst auf die Ableitung der Datenbasis und anschließend auf die entwickelte Methode zur Erzeugung der einzelnen Zyklusbestandteile eingegangen.

4.1 Ableitung der Datenbasis

Die Ableitung der Datenbasis basiert auf Messdaten zum Fahrzeugbetrieb, die unabhängig von spezifischen Einsatzprofilen gewonnen werden können. Benötigt werden lediglich die gemessene Fahrzeuggeschwindigkeit, das Höhenprofil der Strecke und der gefahrene Routenverlauf, der bspw. über ein globales Navigationssatellitensystem (GNSS) aufgezeichnet wurde. Zusätzlich müssen die Fahrzeugkonfiguration (Leermasse, Motorleistung) und Zuladung jeder Messfahrt bekannt sein, um in den Messdaten fahrzeugspezifische Phasen der Untermotorisierung an Steigungen erkennen und eliminieren zu können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zur Gewinnung der Datenbasis exemplarisch die Messdaten des Projekts E³-Trail herangezogen (vgl. [Dop13a] und Kapitel 5.1).

4.1.1 Klassierung Messdaten

Damit für jedes Segment des Einsatzprofils, d.h. für jede mögliche Kombination der hinterlegten Klassen aus Streckentyp, Topographie und Verkehrsdichte, automatisiert ein Zyklus erzeugt werden kann, ist für alle Kombinationsmöglichkeiten ein separater beschreibender Datensatz erforderlich. Bild 4.1 verdeutlicht dies anhand des Beispiels „Autobahn, hügelige Topographie, normale Verkehrsdichte“.

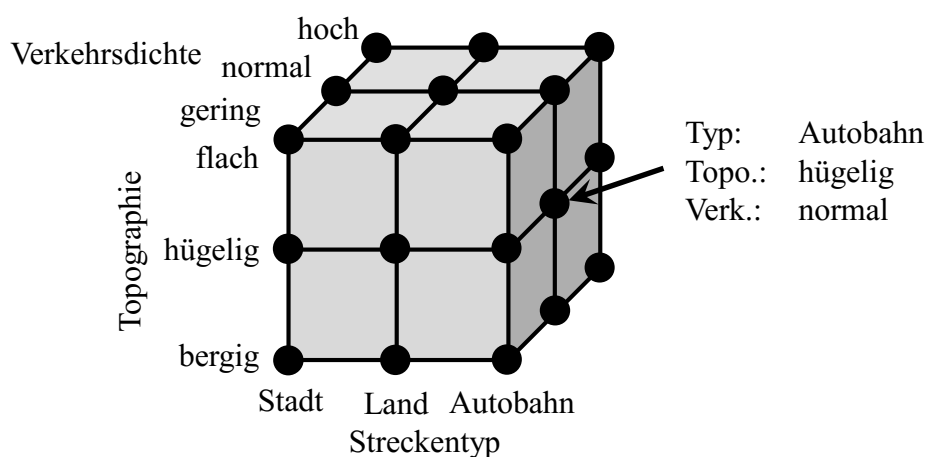


Bild 4.1: Kombinationsmöglichkeiten der Klassen des Einsatzprofils

Für jede der 27 möglichen Kombinationen werden Kenndaten benötigt, die das spezifische Verhalten der stationären Zielgeschwindigkeit, der Events und der Steigung für die jeweilige Kom-

bination charakterisieren. Die Grundlage zur Ableitung der Kenndaten ist damit eine Klassierung und Unterteilung der vorliegenden Messdaten entsprechend der Kombinationsmöglichkeiten.

Die Einteilung der Messdaten in die Klassen des Streckentyps erfolgt anhand des aufgezeichneten GNSS-Positionsverlaufs und des gemessenen Geschwindigkeitsprofils. Der Positionsverlauf je Messfahrt wird in ein digitales Kartenprogramm importiert, sodass eine manuelle Zuordnung einzelner Fahrabschnitte zu den Klassen des Streckentyps möglich ist. Zusätzlich erfolgt ein Abgleich dieser Zuordnung anhand des Geschwindigkeitsprofils bzw. typischer maximaler Geschwindigkeitswerte je Streckentyp (z. B. Landstraße 60-70 km/h, Autobahn größer 80 km/h). Alternativ kann die Unterscheidung des Streckentyps anhand automatischer Identifikationsalgorithmen erfolgen, wie bspw. in [Wei14] durchgeführt. Im genannten Beispiel basiert die Identifikation auf Wegeanteilen klassierter Geschwindigkeitswerte. Mit dem Algorithmus ist allerdings kein eindeutiger Rückschluss auf den tatsächlichen Streckentypen möglich. Beispielsweise können Stausituationen auf Autobahnen aufgrund der vorkommenden niedrigen Geschwindigkeitswerte fälschlicherweise dem Streckentyp *Stadt* zugeordnet werden.

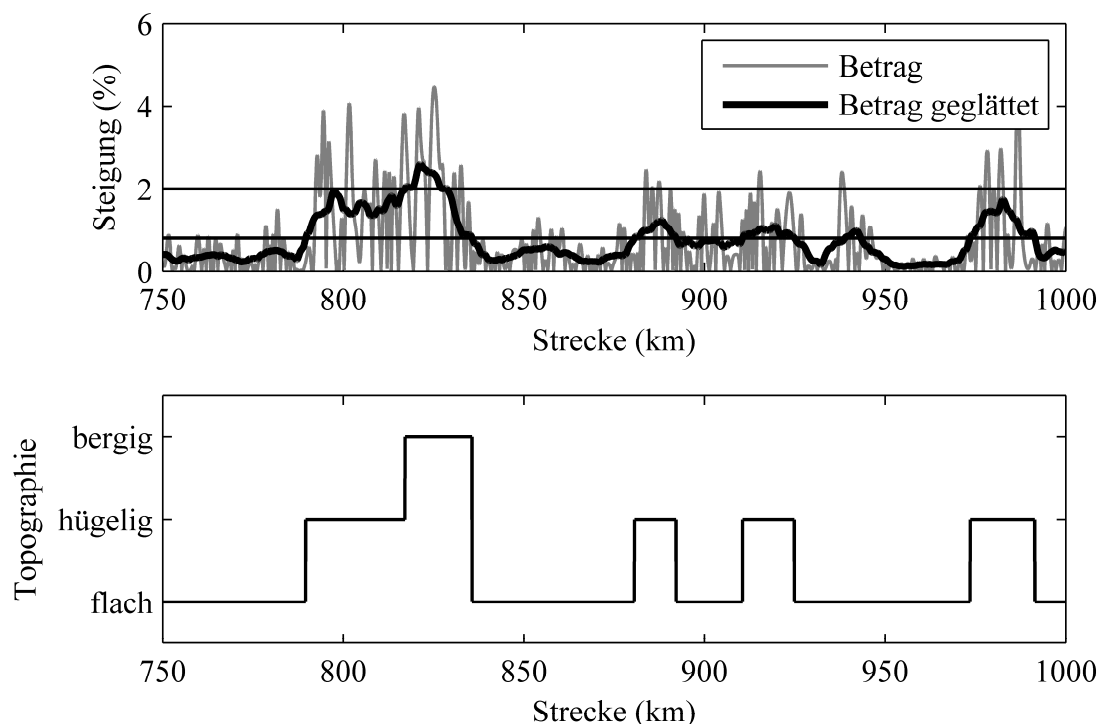


Bild 4.2: Topographische Zuordnung berechneter Steigungsprofile anhand eines Beispiels

Zur topographischen Zuordnung der Messdaten wird aus dem aufgezeichneten absoluten Höhenprofil zunächst der Verlauf der Fahrbahnsteigung in Prozent über dem Weg berechnet. Aus dem Betrag dieses Steigungsprofils wird ein geglätteter Steigungswert abgeleitet, der als Mittelwert über eine gleitende Wegstrecke von 10 km definiert ist. Anhand des geglätteten Werts erfolgt unter Einbeziehung folgender Grenzwerte die topographische Zuordnung.

- Geglätteter Steigungswert $\leq 0,8\%$: flache Topographie
- Geglätteter Steigungswert $> 0,8\%$ und $\geq 2\%$: hügelige Topographie
- Geglätteter Steigungswert $> 2\%$: bergige Topographie

Zur Unterbindung häufiger Klassenwechsel aufgrund einzelner großer Steigungswerte ist ein Wechsel in eine andere Topographiekategorie nur zulässig, wenn der geglättete Steigungswert nach Über- bzw. Unterschreitung der jeweiligen Grenze für eine definierte Wegstrecke in der neuen Klasse verbleibt. Bei einem vorzeitigen Wechsel wird der entsprechende Streckenabschnitt der vorherigen Klasse zugeordnet. Bild 4.2 verdeutlicht dies anhand eines beispielhaften Ausschnitts aus einem Steigungsprofil. Neben dem Betrag des Steigungsprofils ist im unteren Teil der Abbildung die topographische Zuordnung zu sehen. Bei ca. 940 km überschreitet die geglättete Kurve vom Flachen kommend kurzzeitig die Grenze zum Hügeligen. Sie verbleibt allerdings vom Zeitpunkt des Klassenübertritts nicht lange genug in der neuen Klasse, sodass der entsprechende Streckenabschnitt voll der flachen Topographie zugeordnet wird.

Im Projekt E³-Trail wurde das Höhenprofil über einen GNSS-Empfänger aufgezeichnet. Zur Eliminierung von Signalrauschen und einzelner Ausreißer erfolgte eine Annäherung des über dem Weg aufgetragenen Höhenprofils durch Polynome vierter Ordnung. Die gesamte Wegstrecke wurde in äquidistante Intervalle aufgeteilt und je Intervall erfolgte die Annäherung durch ein separates Polynom. Zwischen den Intervallen wurden stetige differenzierbare Übergänge gefordert, sodass sich ein insgesamt stetiges Höhen- und Steigungsprofil ergibt.

Grundsätzlich wäre eine weitere Differenzierung der Messdaten anhand der Verkehrsdichte erforderlich. Da aber während der Messfahrten im Projekt E³-Trail keine geeigneten Kriterien zur Unterscheidung der gewonnenen Daten anhand der Verkehrsdichte aufgezeichnet oder protokolliert wurden, wird folgende Vereinfachung getroffen: Alle vorhandenen Messdaten werden der normalen Verkehrsdichte zugewiesen. Eine hohe oder geringe Verkehrsdichte wird lediglich über eine erhöhte bzw. verringerte Anzahl der Events pro Strecke gegenüber der normalen Verkehrsdichte abgebildet. Es wird somit analog Kapitel 3.3 davon ausgegangen, dass kein Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Verkehrsdichten und dem Verlauf der stationären Zielgeschwindigkeit besteht. Dies ist insofern plausibel, als dass die Zielgeschwindigkeit, die eine maximal zulässige Geschwindigkeit darstellt und bspw. über lokal oder global geltende Geschwindigkeitsbegrenzungen für schwere Nutzfahrzeuge festgelegt wird, analog der Steigung als reine Eigenschaft der Strecke ohne verkehrsbedingte Einflüsse angesehen werden kann. Damit entfällt die dritte Dimension der Verkehrsdichte nach Bild 4.1 und es müssen nur Datensätze in Abhängigkeit des Streckentyps und der Topographieklassen gebildet werden. Dies ist auf Basis der wie beschrieben klassierten Messdaten möglich.

4.1.2 Beschreibende Kenndaten

Im Anschluss an die Klassierung der aufgezeichneten Daten zum Fahrzeugbetrieb werden die gemessenen Geschwindigkeits- und Höhenprofile hinsichtlich spezifischer Kenndaten ausgewertet. Die Gesamtheit aller Kenndaten bildet je Kombination der definierten Streckentypen

und Topographieklassen einen beschreibenden Datensatz. Den Inhalt der Datensätze und damit die einzelnen Kenndaten gibt Tabelle 4.1 wieder. Auf das Vorgehen zur Ableitung der Kenndaten aus den gemessenen Daten wird im weiteren Verlauf des Kapitels eingegangen.

Tabelle 4.1: Inhalt Datensatz zur Charakterisierung des Steigungs- und Geschwindigkeitsprofils sowie der Events je Kombination aus Streckentyp und Topographiekategorie

Kenndaten Steigungsprofil	
STP_a	Anzahl Steigungssegmente normiert auf 100 km
STP_v	Häufigkeitsverteilung mittlerer Steigungswerte je Steigungssegment (Mittelwerte und Standardabweichung)
STP_h	Überwundene Höhendifferenz je Steigungssegment als Funktion der mittleren Steigung
STP_m	Verhältnis der maximalen zur mittleren Steigung je Steigungssegment
Kenndaten Zielgeschwindigkeitsprofil	
ZGP_s	Streckenanteil je stationärer Zielgeschwindigkeitsklasse an Gesamtstrecke
ZGP_a	Anzahl des Vorkommens einer Zielgeschwindigkeitsklasse und Anzahl der Geschwindigkeitswechsel zwischen Zielgeschwindigkeitsklassen normiert auf 100 km
Kenndaten Events (Verzögerungs- und Haltevorgänge im Fahrbetrieb)	
EVN_a	Anzahl aller Events je Zielgeschwindigkeitsklasse normiert auf 100 km
EVN_v	Prozentuale Verteilung der Anzahl an Events je Kombination aus Eventgeschwindigkeit und -dauer
EVN_l	Prozentuale Verteilung der Anzahl an Events je relativer wegbasierter Lage

Zur Bestimmung der Kenndaten des Steigungsprofils wird das Höhenprofil über der Strecke gespiegelt, sodass die Gesamthöhendifferenz zu Null wird. Dies entspricht einem Befahren der Strecke in entgegengesetzter Richtung. Sofern notwendig ist ein gemessenes Höhenprofil zu filtern und zu glätten. Ein möglicher Ansatz hierzu ist in Kapitel 4.1.1 beschrieben. Nach diesen Präprozessen folgt eine Einteilung des gespiegelten und geglätteten Höhenprofils in Segmente. Die Grenze zwischen diesen Steigungssegmenten ist definiert durch die lokalen Maxima und Minima des Höhenprofils. Jedes Segment verfügt damit über die Bild 4.3 zu entnehmenden Eigenschaften. Die mittlere Steigung ergibt sich aus der überwundenen Höhendifferenz und der horizontalen Länge. Demgegenüber ergibt sich die maximale Steigung im Segment aus der maximalen Steigung des geglätteten Verlaufs des Höhenprofils. Aus der statistischen Auswertung dieser Segmenteigenschaften ergeben sich die Kenndaten des Steigungsprofils.

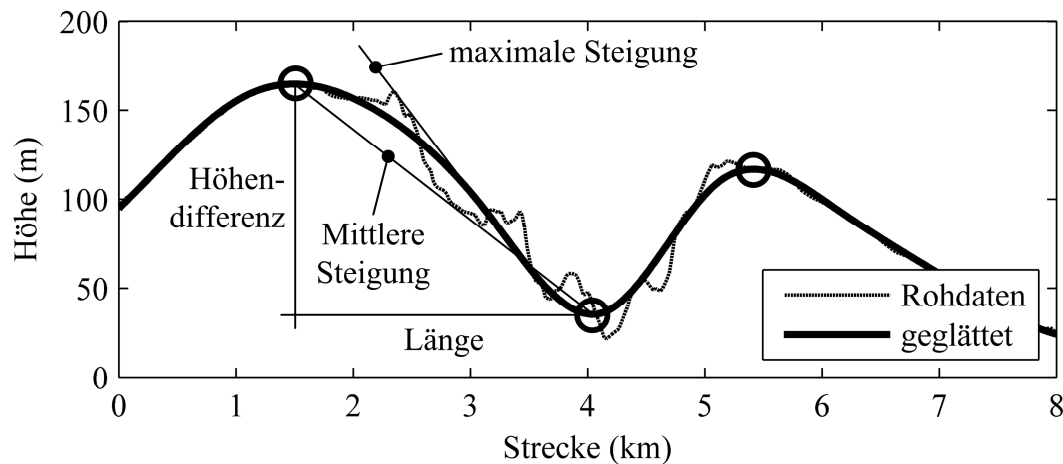


Bild 4.3: Segmentierung des Höhenprofils und Eigenschaften der Steigungssegmente

Zur Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der mittleren Steigungswerte für eine Kombination aus Streckentyp und Topographieklasse STP_v wurden die aus dem gemessenen Höhenprofil berechneten mittleren Steigungswerte klassiert. Die Klassenbreite wurde zu 0,05% gewählt, womit sich im Steigungsbereich von -5,5% bis 5,5% insgesamt 220 Klassen ergeben.

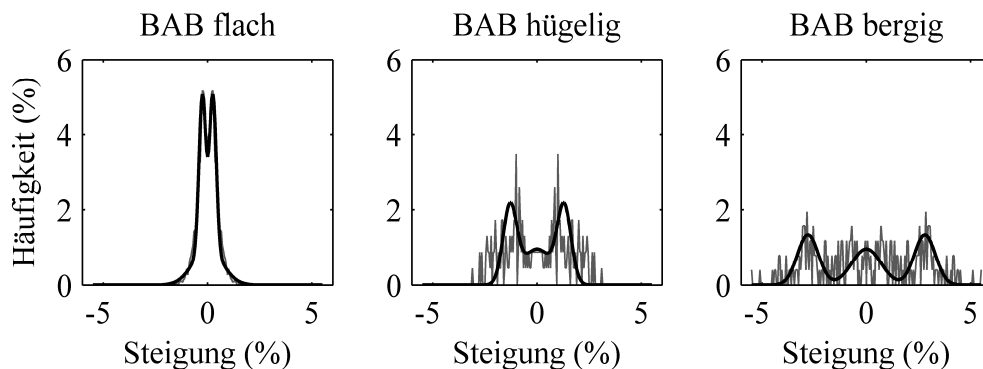


Bild 4.4: Häufigkeitsverteilung der mittleren Steigungswerte am Beispiel des Streckentyps Autobahn

Bild 4.4 zeigt die ermittelten Häufigkeitsverteilungen der klassierten mittleren Steigungswerte am Beispiel des Streckentyps Autobahn. Wie zu erwarten treten bei flachen Topographie überwiegend geringe Steigungswerte auf, während diese bei hügeliger oder bergiger Topographie weiter gestreut sind. Die Häufigkeitsverteilungen werden jeweils durch drei überlagerte Normalverteilungen nachgebildet und auf diese Weise formal beschrieben. Die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen charakterisieren das Verhalten für jede der neun Kombinationsmöglichkeiten aus Streckentyp und Topographie eindeutig und können direkt für die Kenndaten STP_v herangezogen werden.

Die aus den klassierten und segmentierten Messdaten abgeleitete Anzahl der Steigungssegmente pro Strecke STP_a zeigt Bild 4.5. Bei flacher Topographie liegen auf gleicher Strecke mehr Segmente, was unter Berücksichtigung der geringeren mittleren Steigungen auf geringere absolute Höhendifferenzen pro Segment hindeutet.

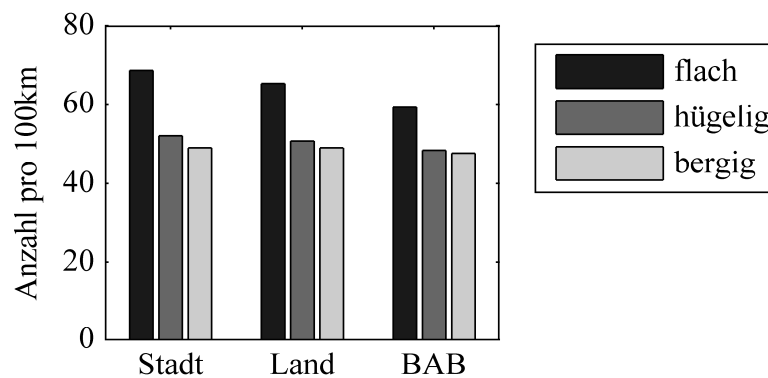


Bild 4.5: Anzahl Segmente im Höhenprofil pro Strecke STP_a für die gewählten Streckenarten und Topographieklassen

Dies bestätigt Bild 4.6. Dargestellt ist die Häufigkeit der absolut überwundenen Höhendifferenz STP_h je mittlerer Steigung und Segment. Aufgrund der größeren Steigungswerte und der geringeren Anzahl an Segmenten pro Strecke werden im Bergigen und Hügeligen größere Höhendifferenzen je Steigungssegment überwunden. Das gezeigte Verhalten lässt sich jeweils durch ein Polynom dritten Grades annähern. Die Koeffizienten der Funktion beschreiben das Verhalten der jeweiligen Kombinationen aus Streckentyp und Topographie eindeutig und bilden den zugehörigen Datensatz STP_h . Die Funktionen wurden auf Maximalwerte begrenzt, da größere Höhendifferenzen nur selten auftraten. Das Verhältnis der maximal auftretenden Steigung zur mittleren Steigung je Steigungssegment STP_m wird als Mittelwert aller Steigungssegmente einer Kombination berechnet und folglich durch ein einzelnes Skalar beschrieben.

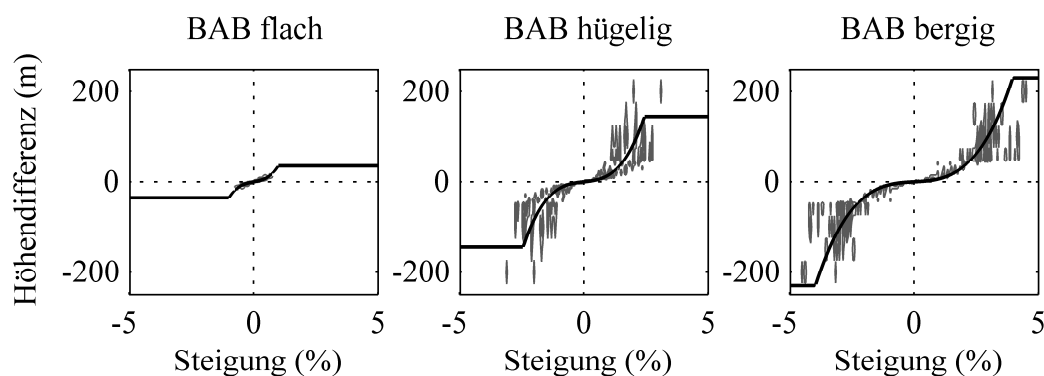


Bild 4.6: Überwundene Höhendifferenz über der mittleren Steigung am Beispiel des Streckentyps Autobahn

Die Kenndaten zur Beschreibung des Zielgeschwindigkeitsprofils sind ebenfalls separat für alle 9 Kombinationsmöglichkeiten aus Streckentyp und Topographie zu ermitteln. Die Grundlage bilden die nach Kapitel 4.1.1 eingeteilten Verläufe der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit. Bild 4.7 zeigt einen exemplarischen Messschrieb der Geschwindigkeit über der Zeit. In diesem sind in der oberen Grafik alle lokalen Maxima und Minima gekennzeichnet, die im weiteren Verlauf die Basis zur Ermittlung der Kenndaten bilden. Haltevorgänge bei Geschwindigkeit Null werden über ein Minimum jeweils zu Beginn und Ende des Stopps gekennzeichnet.

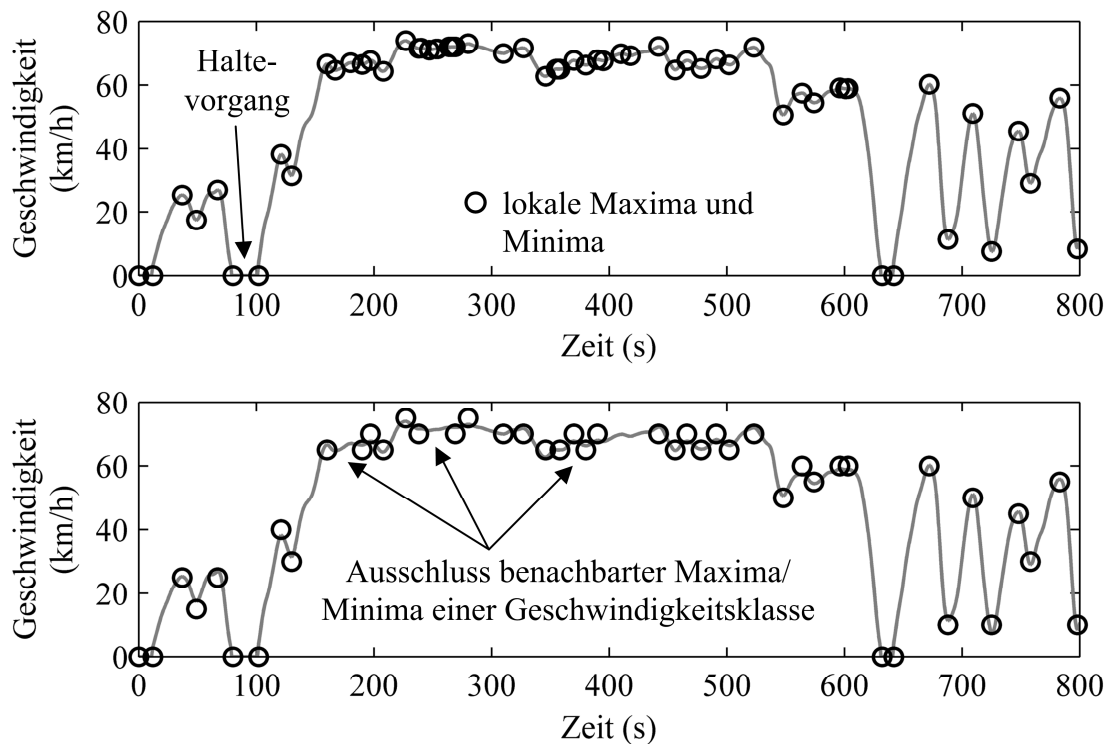


Bild 4.7: Vorbereitung zur Ermittlung der Kenndaten des Zielgeschwindigkeitsprofils

Zwecks statistischer Auswertung sind die lokalen Maxima und Minima hinsichtlich ihres Geschwindigkeitswerts zu klassieren. Dazu wird eine Klassenbreite von 5 km/h verwendet, womit sich 18 Klassen im Intervall von 0 km/h bis 90 km/h ergeben. Diese Klassen entsprechen den späteren Zielgeschwindigkeitsklassen $v_{Ziel,i}$ des Fahrzyklus. Von direkt benachbarten und der gleichen Klasse zugeordneten Maxima und Minima werden lediglich das erste und letzte Maximum bzw. Minimum zur weiteren Auswertung herangezogen. Alle weiteren werden ausgeschlossen und nicht weiter betrachtet. Das Ergebnis dieser Schritte zeigt Bild 4.7 unten.

Gemäß Kapitel 3 sollen der zu erzeugende Fahrzyklus und das enthaltene Zielgeschwindigkeitsprofil keine Fahrzeuginformationen enthalten. Einflüsse des zur Messung verwendeten Fahrzeugs dürfen sich nicht auf die Kenndaten auswirken und sind im Vorfeld der Auswertung zu identifizieren. Dies betrifft insbesondere den Einfluss steigungsbasierter Effekte. Mit den Parametern des zur Messung verwendeten Fahrzeugs und auf Basis des gemessenen Geschwindigkeits- und Steigungsprofils wird hierzu die benötigte Antriebsleistung abgeschätzt. Bricht die gemessene Geschwindigkeit trotz deutlich positiver Antriebsleistung und Steigung ein, handelt es sich um einen steigungsbasierten Effekt. Die zugehörigen Minima werden im weiteren Verlauf der Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

Mit den verbleibenden Maxima und Minima lässt sich abschließend der um Fahrzeugeinflüsse bereinigte Verlauf der Zielgeschwindigkeit während der Messfahrten ermitteln, aus dessen Auswertung die benötigten Kenndaten abzuleiten sind. Ein exemplarisches Ergebnis und damit Zielgeschwindigkeitsprofil zeigt Bild 4.8.

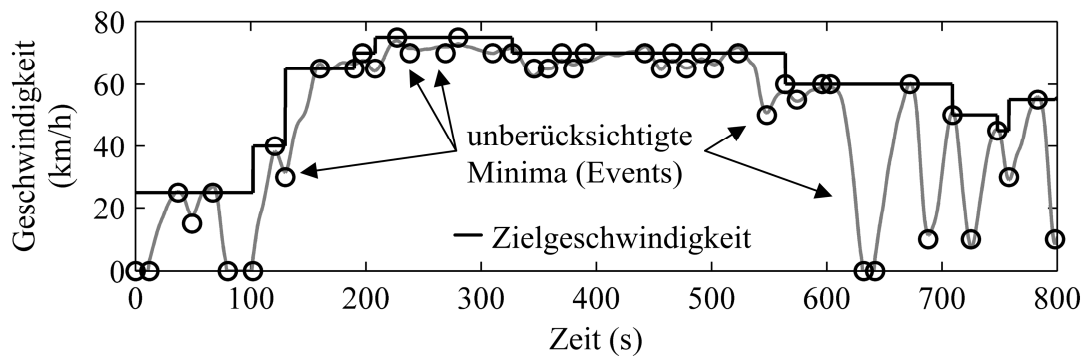


Bild 4.8: Zielgeschwindigkeitsprofil für exemplarischen Messschrieb

Die Bestimmung des Zielgeschwindigkeitsprofils basiert auf folgenden Regeln.

- Liegt ein einzelnes lokales Minimum zwischen zwei Maxima mit identischem Geschwindigkeitswert, erhält die Zielgeschwindigkeit an der Position des Minimums den Wert der beiden Maxima. Nach gleichem Schema wird für zwei direkt aufeinander folgende identische Minima vorgegangen, die ebenfalls zwischen zwei Maxima liegen.
- Während Haltevorgängen wird die zuvor gültige Zielgeschwindigkeit beibehalten.
- Folgt auf ein Minimum ein Maximum mit einem vom vorherigen Maximum abweichenden Geschwindigkeitswert, gilt bis einschließlich zum Minimum die Geschwindigkeit des vorherigen Maximums. Ab dem Minimum wird die Geschwindigkeit des folgenden Maximums übernommen.
- Alle im Zielgeschwindigkeitsprofil nicht berücksichtigten Minima und Haltevorgänge werden im weiteren Verlauf als Event im Fahrbetrieb behandelt und fließen auf diese Weise in den Fahrzyklus ein.

Über die Auswertung des auf Basis lokaler Maxima und Minima ermittelten Zielgeschwindigkeitsprofils folgt im nächsten Schritt die Bestimmung der Kenndaten zur statistischen Beschreibung des Profils. Der Ansatz weist dabei Parallelen zu [Bru00] auf, der ebenfalls lokale Maxima und Minima im gemessenen Geschwindigkeitsprofil verwendet.

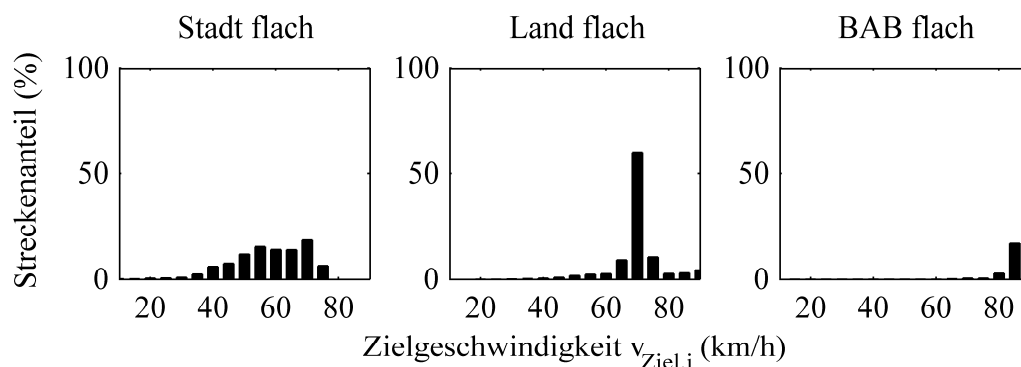


Bild 4.9: Streckenanteil ZGP_s je Zielgeschwindigkeitsklasse i am Beispiel flacher Topographie

Die Kenngröße ZGP_s beschreibt jeweils für eine Kombination aus Streckentyp und Topographieklasse den Anteil an der Gesamtstrecke einer Zielgeschwindigkeitsklasse. Ein exemplarisches Ergebnis für die verschiedenen Streckenarten bei flacher Topographie ist Bild 4.9 zu entnehmen. Wie zu erwarten ist der Streckenanteil geringer Geschwindigkeitswerte bei städtischen Fahrten größer als bei Überland- und Autobahnfahrten. Bei Überlandfahrten wurde im zugrunde liegenden Messdatensatz die meiste Strecke bei 70 km/h zurückgelegt und bei Autobahnfahrten bei 85-90 km/h.

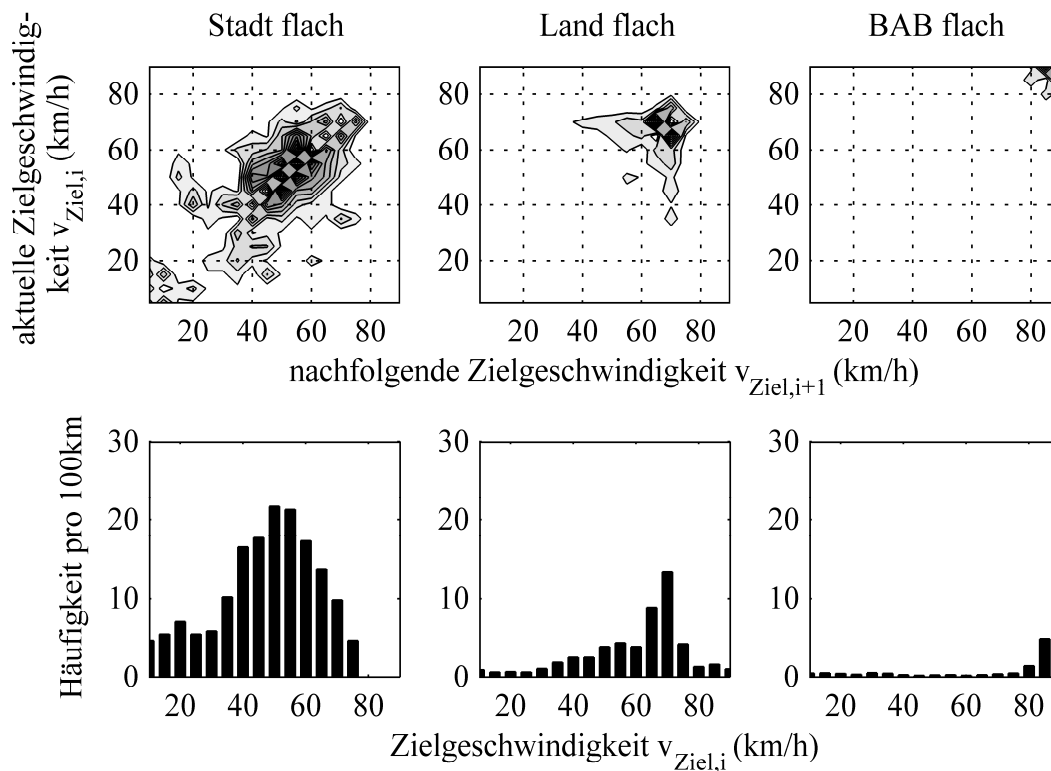


Bild 4.10: Häufigkeit des Vorkommens einer Zielgeschwindigkeitsklasse (unten) und der von dieser ausgehenden spezifischen Geschwindigkeitswechsel ZGP_a für flache Topographie

Eine weitere Kenngröße zur Charakterisierung des Zielgeschwindigkeitsprofils ZGP_a bilden die Anzahl des Vorkommens einer Zielgeschwindigkeitsklasse und die von dieser ausgehenden Geschwindigkeitswechsel zur jeweils nachfolgenden Zielgeschwindigkeitsklasse. Die Kenndaten werden jeweils auf die einheitliche Distanz von 100 km bezogen. Bild 4.10 zeigt die Häufigkeit, mit der im Zielgeschwindigkeitsprofil von einer aktuellen Zielgeschwindigkeit $v_{Ziel,i}$ (y-Achse) zu einer nachfolgenden Zielgeschwindigkeit $v_{Ziel,i+1}$ (x-Achse) gewechselt wird. Eine dunkle Färbung innerhalb dieser Wechselmatrix steht dabei für ein häufiges Vorkommen des entsprechenden Wechsels. Für den Fall Land flach kommt bspw. der Wechsel von der Ausgangsgeschwindigkeit 70 km/h zur nachfolgenden Geschwindigkeit 65 km/h sehr häufig vor, während ein direkter Wechsel von 70 km/h auf 20 km/h oder 30 km/h so gut wie nicht vorkommt. Die Summe aller vorkommenden Wechsel bzw. Einträge je Spalte der Wechselmatrix

ergibt die Gesamthäufigkeit des Vorkommens einer Zielgeschwindigkeitsklasse. Das entsprechende Ergebnis zeigt der untere Teil der Abbildung. Da die Informationen zur Gesamthäufigkeit in der Wechselmatrix enthalten sind, ist kein separater Kenndatensatz erforderlich.

Zur Erzeugung synthetischer Fahrzyklen ist mit diesen Kenndaten das Verhalten der Zielgeschwindigkeit für die Kombinationsmöglichkeiten aus Streckentyp und Topographie ausreichend beschrieben. Wie gefordert sind in den Kenndaten keine Informationen zu Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgängen enthalten, da diese Eigenschaften von Fahrer und Fahrzeug sind.

Abschließend sind die nicht in das Zielgeschwindigkeitsprofil eingegangenen lokalen Minima auszuwerten (vgl. Bild 4.8), die direkt den Events im Sinne des entwickelten Ansatzes entsprechen. Die Kenndaten EVN_a , EVN_v und EVN_l sind das Ergebnis der statistischen Auswertung der Minima nach der Anzahl pro Strecke, der Verteilung von Geschwindigkeit und Dauer sowie der Lage. Die Betrachtung erfolgt für jede der neun Kombinationsmöglichkeiten aus Streckentyp und Topographie mit weiterer Differenzierung nach den Klassen der Zielgeschwindigkeit. Das Verhalten der Events ist somit separat für jede Zielgeschwindigkeitsklasse beschrieben.

Wie erläutert gehen steigungsbasierte Geschwindigkeitsverringerungen nicht in die Auswertung ein. Außerdem werden Events bzw. Minima nicht berücksichtigt, die am Ende eines Zielgeschwindigkeitssegments liegen und deren klassierter Geschwindigkeitswert der nächsten Zielgeschwindigkeit entspricht. Nur bei einer Event-Geschwindigkeit kleiner als die nächste Zielgeschwindigkeit werden die Events/Minima in die Auswertung einbezogen. Im entwickelten Ansatz zur automatischen Erzeugung der streckenbasierten Events werden alle Verringerungen in der Zielgeschwindigkeit automatisiert als zusätzliche Events extrahiert. Zur Vermeidung von Doppelungen bleiben die genannten Events/Minima daher an dieser Stelle in der Auswertung unberücksichtigt.

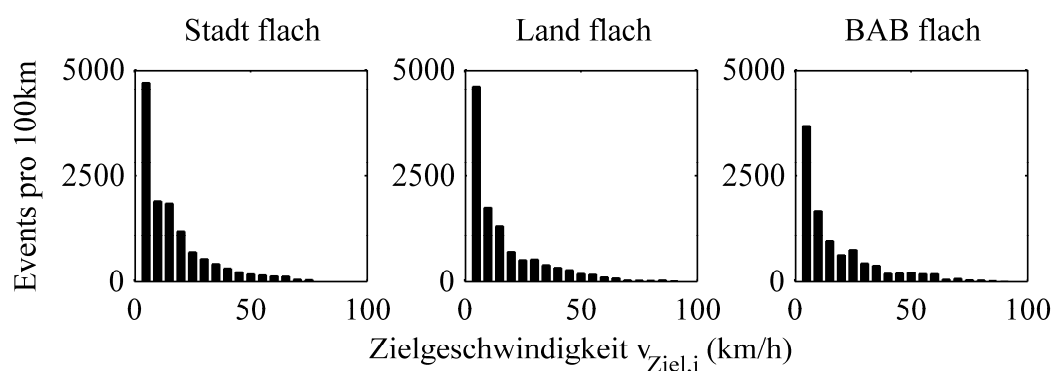


Bild 4.11. Anzahl der Events EVN_a differenziert nach Zielgeschwindigkeitsklassen am Beispiel flacher Topographie

Als Ergebnis der Auswertung zeigt Bild 4.11 die Anzahl der Events je Zielgeschwindigkeitsklasse EVN_a normiert auf die einheitliche Distanz von 100 km. Darüber hinaus ist je Zielgeschwindigkeitsklasse eine Auswertung der Events nach Eventgeschwindigkeit und -dauer möglich. Bild 4.12 enthält links eine exemplarische prozentuale Häufigkeitsverteilung für den Fall

Stadt flach und eine Zielgeschwindigkeit von 45 km/h. Eine dunkle Färbung entspricht einem hohen Prozentwert und damit einem häufigen Vorkommen. Entsprechend der Definition der Events liegen diese immer unterhalb der jeweiligen Zielgeschwindigkeit, sodass bei der Zielgeschwindigkeit von 45 km/h die maximale Eventgeschwindigkeit 40 km/h beträgt. Während die Events bei niedrigen Eventgeschwindigkeiten häufig eine längere Dauer aufweisen, verschiebt sich dies bei höheren Eventgeschwindigkeiten zu kürzeren Events.

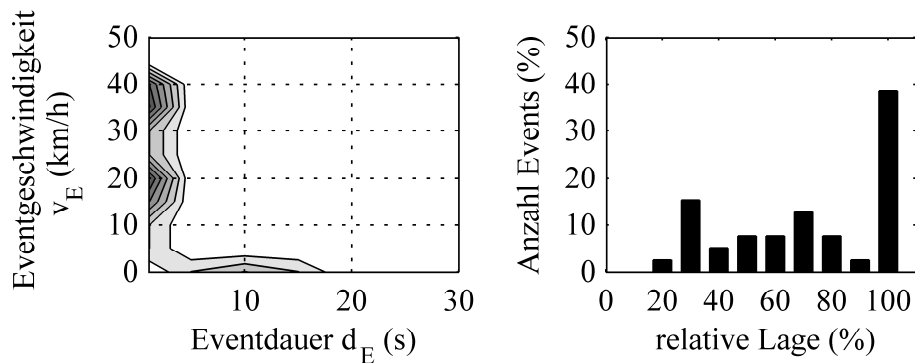


Bild 4.12: Verteilung Eventgeschwindigkeit und -dauer EVN_v (links) und der relativen Lage der Events EVN_l (rechts) am Beispiel Stadt flach für die Zielgeschwindigkeit 45 km/h

Neben der absoluten Anzahl und der prozentualen Verteilung von Eventgeschwindigkeit und Eventdauer ist ein Kennwert für die Streckenposition der Events festzulegen. Hierzu wird die relative Lage EVN_l herangezogen, wobei zur statistischen Auswertung für diese eine Klassenbreite von 10% gewählt wurde. Die relative Lage gibt je Zielgeschwindigkeitsklasse an, wo sich die Events innerhalb der zugehörigen Abschnitte im Zielgeschwindigkeitsprofil befinden. Bei einer relativen Lage von 0% liegen die Events am Anfang eines Abschnitts im Zielgeschwindigkeitsprofil, bei 50% exakt in der Mitte und bei 100% am Ende. Bild 4.12 zeigt rechts exemplarisch eine prozentuale Verteilung der relativen Lage am Beispiel Stadt flach und der Zielgeschwindigkeit 45 km/h. Kommt diese Zielgeschwindigkeit in den Messdaten bzw. im zu erzeugenden Fahrzyklus vor, so liegen für die gezeigte Verteilung etwa 40% der Events am Ende der zur Zielgeschwindigkeit gehörenden Streckenabschnitte, knapp 10% in der Mitte und keins am Anfang.

4.2 Steigungsprofil

Gemäß Kapitel 3.3 ist für jede Kombination der Klassen aus Streckentyp und Topographie ein synthetisches Steigungsprofil über dem Weg zu generieren. Das Steigungsprofil soll sich wie erläutert aus einzelnen Abschnitten in Form von Trapezen zusammensetzen, die im weiteren Verlauf als Steigungssegmente bezeichnet werden. Positive und negative Steigungssegmente sollen im direkten Wechsel folgen und die insgesamt überwundene Höhendifferenz soll Null sein, damit die potentielle Energie des Fahrzeugs zu Fahrbeginn und Fahrtende identisch ist. Zudem hat das statistische Verhalten des erzeugten Steigungsprofils mit den Kenndaten des vorherigen Kapitels und damit dem realen Steigungsverhalten übereinzustimmen.

Die automatische Erzeugung des Steigungsprofils erfolgt separat für jedes Segment des Einsatzprofils mit den enthaltenen Vorgaben. Durch das anschließende Aneinanderfügen der einzelnen Höhenprofile entsteht das vollständige Höhenprofil für das gegebene Einsatzprofil.

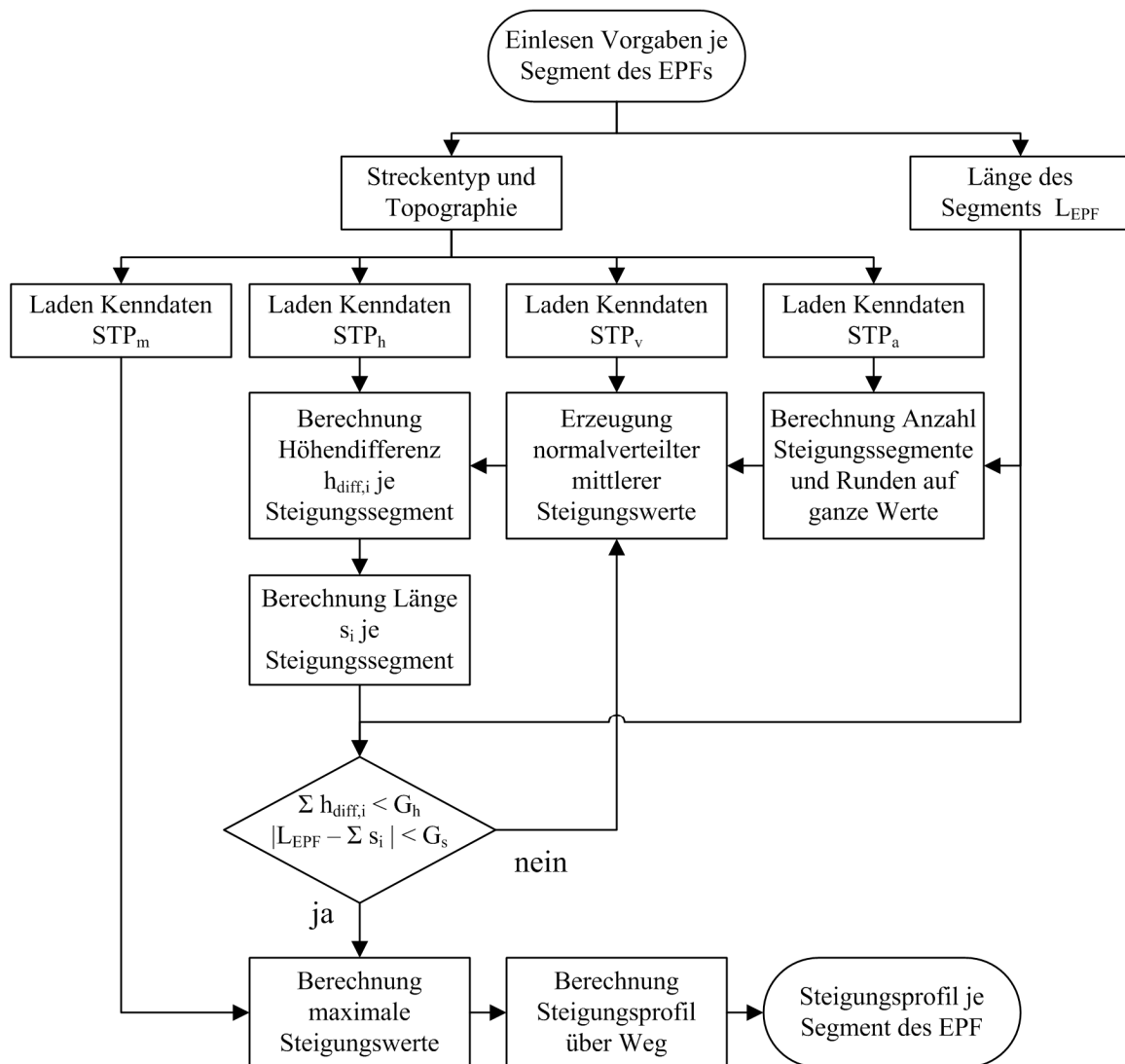


Bild 4.13: Vorgehen zur automatisierten Erzeugung des Steigungsprofils für ein Segment des Einsatzprofils

Zur automatisierten Erzeugung des Steigungsprofils wird entsprechend Bild 4.13 vorgegangen. Je Segment des Einsatzprofils sind der Streckentyp, die Topographie sowie die Länge L_{EPF} bekannt. Mit den Informationen zu Streckentyp und Topographie werden die für die jeweilige Kombination gültigen Kenndaten zur Beschreibung des statistischen Verhaltens der Fahrbahnsteigung geladen. Auf Basis der Anzahl an Steigungssegmenten pro Strecke STP_a und der Länge L_{EPF} des Teilzyklus wird die absolute Anzahl der Steigungssegmente bestimmt und auf ganzzahlige Werte gerundet. Anschließend wird auf Grundlage der Kenndaten STP_v eine der Anzahl an Steigungssegmenten entsprechende Anzahl zufällig normalverteilter mittlerer Steigungswerte erzeugt. Mit den Kenndaten STP_h lässt sich je Steigungssegment die überwundene Höhendifferenz $h_{diff,i}$ als Funktion der zuvor erzeugten mittleren Steigungswerte berechnen.

Aus überwundener Höhendifferenz und mittlerer Steigung resultiert zuletzt die Länge s_i jedes einzelnen Steigungssegments.

Die aufsummierte Länge aller Steigungssegmente wird nicht exakt der Längenvorgabe des Einsatzprofils L_{EPF} entsprechen, da dem Vorgehen zufällig erzeugte mittlere Steigungswerte zugrunde liegen. Auch wird die insgesamt überwundene Höhendifferenz ungleich Null sein. Deshalb ist das zuvor beschriebene Vorgehen in einer Schleife bis zur Erzeugung eines Datensatzes mittlerer Steigungswerte zu wiederholen, für den die Längenabweichung und die kumulierte Höhendifferenz kleiner als entsprechende Grenzwerte G_h und G_s sind. Bei Nichterfüllung der Kriterien wird die Schleife nach einer vordefinierten Anzahl an Durchläufen abgebrochen und es wird das bis dahin gefundene Optimum verwendet.

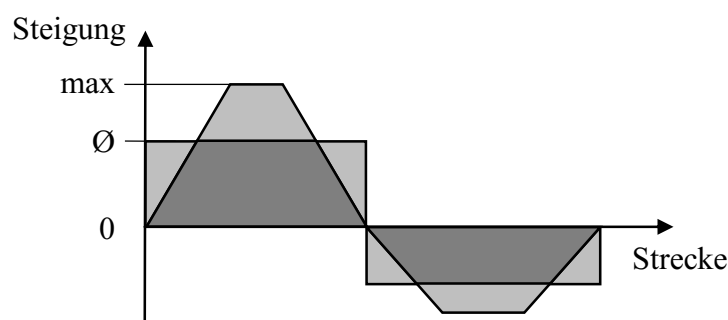


Bild 4.14: Steigungsprofil mit durchschnittlicher und maximaler Steigung

Das durchschnittliche Verhältnis von maximaler zu mittlerer Steigung STP_m dient anschließend der Bestimmung des maximalen Steigungswerts je Steigungssegment. Damit liegen alle relevanten Informationen zur Berechnung des für den Fahrzyklus benötigten trapezförmigen Steigungsprofils über dem Weg vor. In Bild 4.14 ist der Ausschnitt eines Steigungsprofils auf Basis der mittleren Steigungswerte als Rechteckprofil gezeigt. Die mittleren Steigungswerte sind jeweils über der gesamten Länge des jeweiligen Steigungssegments konstant. Zwischen den Segmenten auftretende Sprünge bzw. Unstetigkeiten entsprechen einem Knick im Höhenprofil, weshalb für das zu erzeugende Steigungsprofil ein trapezförmiger Verlauf angenommen wird. Der Maximalwert des Trapezes entspricht der berechneten maximalen Steigung im Steigungssegment. Die der maximalen Steigung zugeordnete Streckenlänge wird derart berechnet, dass die Flächeninhalte des Trapezes und Rechtecks und damit die jeweils überwundenen Höhendifferenzen identisch sind.

Mit dieser Methode lassen sich unter Verwendung der jeweiligen Kenndaten für alle Kombinationen aus Streckentyp und Topographie synthetische Steigungsprofile erzeugen. Diese geben jeweils das hinterlegte statistische Verhalten der Steigungswerte wieder und erfüllen die Forderungen nach Streckenlänge und insgesamt überwundener Höhendifferenz. Mit der Erzeugung zufällig normalverteilter Steigungswerte liegt dem vorgestellten Ansatz ein stochastisches Element zugrunde. Bei mehrmaliger Erzeugung eines Steigungsprofils mit gleichen Eingangsdaten weist das Ergebnis bei gleichem statistischem Verhalten jedes Mal eine leicht abweichende

Gestalt auf. Sofern für Analysen, Vergleiche oder Bewertungen immer der identische und einmalig erzeugte Fahrzyklus verwendet wird, ist dies jedoch irrelevant.

Wie exakt das hinterlegte statistische Verhalten durch die erzeugten mittleren Steigungswerte nachgebildet werden kann, hängt maßgeblich von der Streckenlänge des aktuellen Segments im Einsatzprofil ab. Bild 4.15 verdeutlicht dies am Beispiel eines Autobahnsegments mit bergiger Topographie und unterschiedlicher Länge. Die Längeninformation fließt zusammen mit den Kenndaten STP_a in die Berechnung der zugeordneten Anzahl an Steigungssegmenten ein. Daraus ergibt sich eine entsprechende Anzahl normalverteilter mittlerer Steigungswerte.

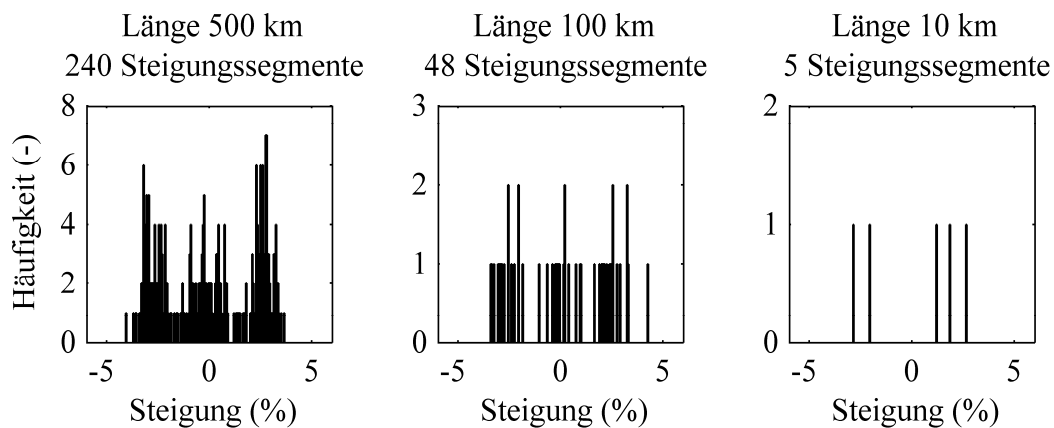


Bild 4.15: Absolute Häufigkeit erzeugter Steigungswerte für unterschiedliche Streckenlängen am Beispiel BAB bergig

Für große Segmentlängen mit vielen Steigungssegmenten ist das hinterlegte statistische Verhalten der drei überlagerten Normalverteilungen (vgl. Bild 4.4) in der Verteilung der erzeugten Steigungswerte gut erkennbar. Demgegenüber kann bei kurzer Segmentlänge aufgrund der geringen Anzahl an Steigungssegmenten nicht mehr eindeutig von der Verteilung der erzeugten Steigungswerte auf das tatsächlich zugrunde liegende statistische Verhalten geschlossen werden.

4.3 Geschwindigkeitsprofil

Analog zur Erzeugung des Steigungsprofils wird für jedes Segment des Einsatzprofils unter Einbeziehung der jeweiligen Länge, des Streckentyps und der Topographie zunächst ein separater Verlauf der Zielgeschwindigkeit erzeugt. Durch Aneinanderreihen aller entsprechend erzeugten Teilzyklen ergibt sich ein Gesamtzyklus für die Zielgeschwindigkeit entsprechend der Vorgaben des Einsatzprofils. Beim Zielgeschwindigkeitsprofil handelt es sich um ein über dem Weg vorgegebenes Rechteckprofil, das aus aufeinanderfolgenden Zielgeschwindigkeitssegmenten besteht (vgl. Bild 3.4). Jede enthaltene Zielgeschwindigkeitsklasse ist charakterisiert durch die Häufigkeit ihres Vorkommens sowie durch eine insgesamt und je Zielgeschwindigkeitssegment zugewiesene Streckenlänge. Charakteristisch für ein spezifisches Geschwindigkeitsprofil ist zudem das Wechselverhalten zwischen den Zielgeschwindigkeitsklassen. Bild

4.16 verdeutlicht das Vorgehen zur automatisierten Erzeugung des Zielgeschwindigkeitsprofils.

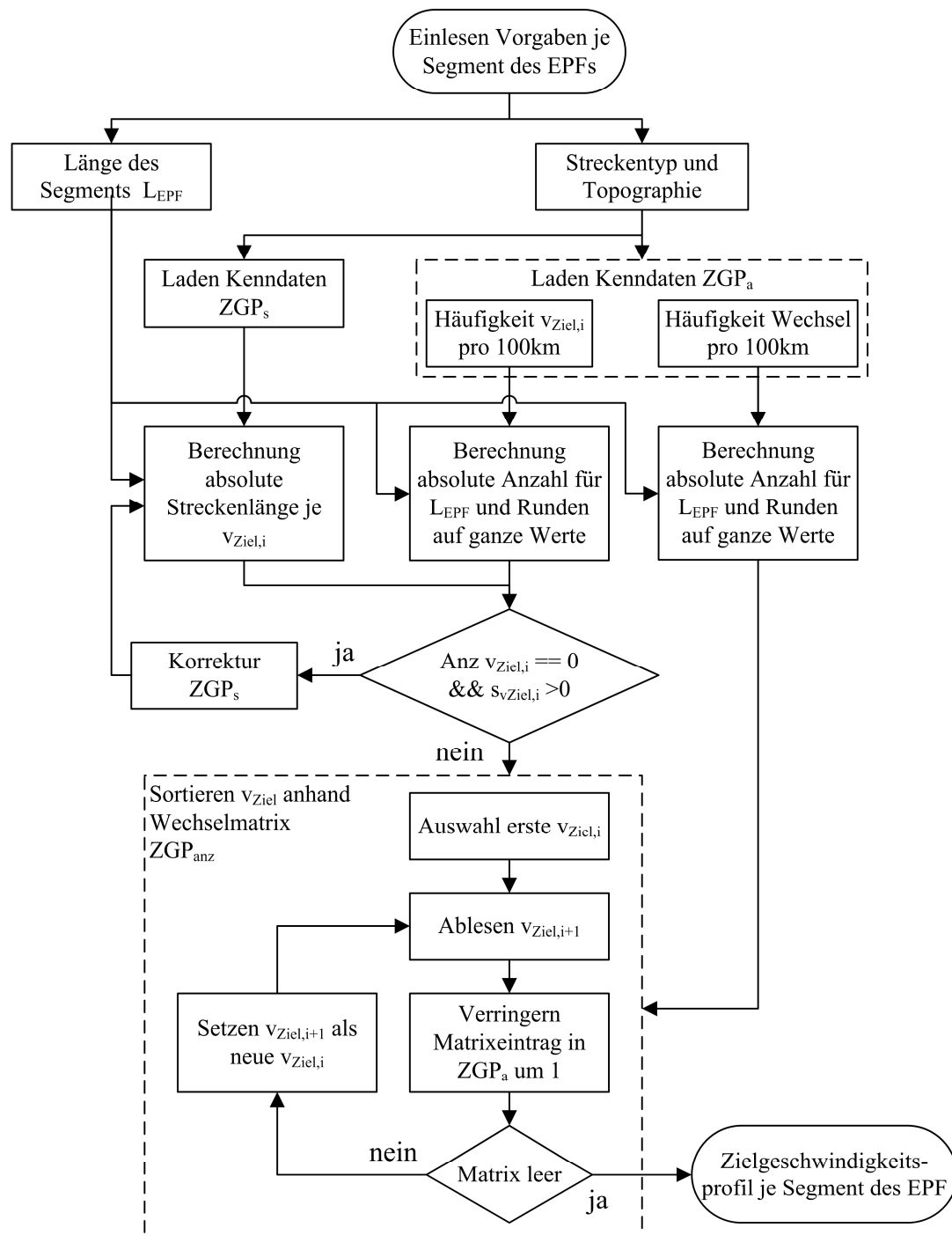


Bild 4.16: Vorgehen zur automatisierten Erzeugung des Zielgeschwindigkeitsprofils für ein Segment des Einsatzprofils

Mit Kenntnis des aktuellen Streckentyps und der Topographiekategorie werden zu Beginn die jeweiligen Kenndaten geladen. Dies sind der prozentuale Streckenanteil ZGP_s je Zielgeschwindigkeitsklasse i , deren Häufigkeit und die Anzahl der Geschwindigkeitswechsel. Letztere Kenndaten sind in ZGP_a zusammengefasst und jeweils bezogen auf die einheitliche Distanz 100 km.

Unter Verwendung der aus dem Einsatzprofil bekannten Länge L_{EPF} lassen sich je Zielgeschwindigkeitsklasse die absolute Streckenlänge, die absolute Häufigkeit des Vorkommens (entspricht der jeweiligen Anzahl an Zielgeschwindigkeitssegmenten) und die absolute Anzahl an Geschwindigkeitswechseln berechnen. Die beiden letzten Kenndaten sind dabei auf ganzzahlige Werte zu runden.

Ergibt eine anschließende Prüfung, dass bedingt durch ein eventuelles Abrunden der Häufigkeit auf Null eine Zielgeschwindigkeitsklasse i nicht mehr vorkommt (Anzahl $v_{Ziel,i} == 0$), dieser aber dennoch eine Streckenlänge $s_{v_{Ziel,i}}$ zugeordnet ist, wird der Streckenanteil ZGP_s der betreffenden Zielgeschwindigkeitsklasse auf die verbleibenden Geschwindigkeitsklassen aufgeteilt. Dieses Vorgehen führt insbesondere für kurze Teilzyklen zu einer nur angenäherten Nachbildung des statistischen Verhaltens der Kenndaten. Am Ende dieses Kapitels wird dieser Effekt anhand eines Beispiels weiter verdeutlicht.

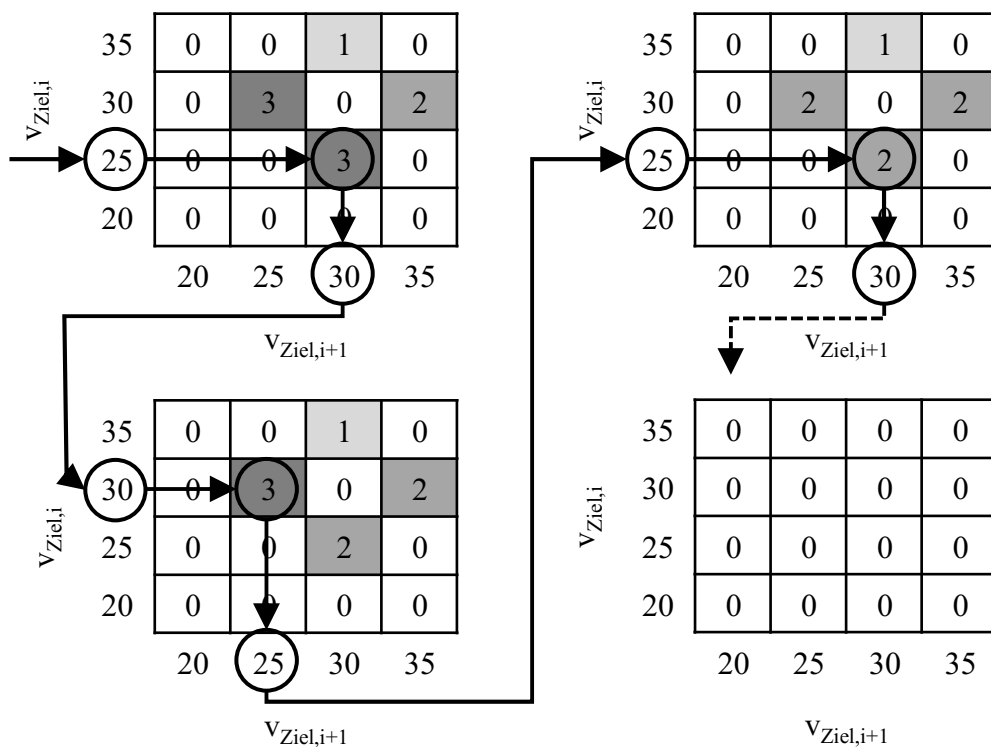


Bild 4.17: Vorgehen zur Sortierung der vorkommenden Zielgeschwindigkeiten anhand der gerundeten Einträge in ZGP_a - Wechsel von einer aktuellen Zielgeschwindigkeit i zur jeweils nachfolgenden $i+1$

Nach Vorlage aller Informationen zu den vorkommenden Zielgeschwindigkeitsklassen und Geschwindigkeitswechseln folgt die Erzeugung des eigentlichen Geschwindigkeitsprofils über dem Weg. Dies entspricht einem Sortieren der mit jeweils einer definierten Häufigkeit vorkommenden Zielgeschwindigkeitssegmente, sodass deren Reihenfolge über dem Weg den Vorgaben der Wechselmatrix entspricht (vgl. Bild 4.17). Die Sortierung geschieht in chronologischer Reihenfolge folgender Schritte:

Schritt 1: Auswahl der ersten Start-Zielgeschwindigkeitsklasse i bzw. der dieser zugeordneten Zeile in der Wechselmatrix. Die Zeile mit dem am häufigsten vorkommenden Geschwindigkeitswert wird anhand des höchsten korrespondierenden Matrixeintrags als Ausgangspunkt gewählt. Bei mehreren identischen Matrixeinträgen ist die Zeile der geringsten Zielgeschwindigkeit priorisiert.

Schritt 2: Bestimmung der Spalte mit der nachfolgenden Zielgeschwindigkeit $i+1$ anhand der größten enthaltenen Häufigkeit innerhalb der zuvor ausgewählten Zeile. Bei mehrmaligem Vorkommen eines Häufigkeitswerts findet zunächst die Spalte des kleinsten Geschwindigkeitswerts Verwendung. Sobald die Hälfte aller vorkommenden Wechsel abgearbeitet wurde, wird die höchste Geschwindigkeit gewählt. Durch dieses Vorgehen werden im erzeugten Fahrzyklus stetig wiederkehrende identische Geschwindigkeitswechsel umgangen.

Schritt 3: Verringerung des Eintrags in der Wechselmatrix für die gewählte Kombination aus Zeile und Spalte um Eins. Die ermittelte nachfolgende Zielgeschwindigkeit wird als neue Start-Zielgeschwindigkeit und damit als neue Ausgangszeile verwendet.

Diese Schritte werden solange wiederholt, bis die Wechselmatrix nur noch Nullen enthält und alle Wechsel abgearbeitet wurden. Das Ergebnis dieses einfachen Sortieralgorithmus ist die Reihenfolge aller Zielgeschwindigkeitssegmente über dem Weg. Parallel lässt sich aus dem absoluten Streckenanteil und der Häufigkeit jeder Zielgeschwindigkeit die in einem Segment zurückgelegte Strecke bestimmen. Aus der Kombination dieser Informationen ergibt sich abschließend das angestrebte Geschwindigkeitsprofil über dem Weg.

Insbesondere für kurze Segmente des Einsatzprofils oder kurze Teilzyklen wirken sich Rundungseinflüsse in ZGP_a auf die Häufigkeit des Vorkommens einer Geschwindigkeitsklasse und die Geschwindigkeitswechsel im erzeugten Zielgeschwindigkeitsprofil aus. Je länger das betreffende Segment des Einsatzprofils ist, desto weniger fallen die Rundungseinflüsse ins Gewicht und desto besser lässt sich mit dem gezeigten Vorgehen das Wechselverhalten nachbilden. Bild 4.18 verdeutlicht dies für das Beispiel Stadt flach anhand des Vergleichs der hinterlegten Kenndaten mit den entsprechenden Verteilungen eines erzeugten Geschwindigkeitsprofils für 20 km und 10 km Länge.

Im oberen Teil ist die Häufigkeit der Zielgeschwindigkeitsklassen für die auf 100 km bezogenen Kenndaten ZGP_a und für die beiden erzeugten Geschwindigkeitsprofile gezeigt. Durch das Skalieren auf die jeweilige Länge und das Runden auf ganzzahlige Werte ist die Häufigkeitsverteilung nur angenähert nachgebildet. Während bei 20 km Länge noch alle Zielgeschwindigkeitsklassen vorkommen, führt ein Runden auf Null bei der gezeigten kürzeren Streckenlänge von 10 km zu einem Wegfall einiger Zielgeschwindigkeitsklassen und damit auch zu einer nur angenäherten Nachbildung der Wechselmatrix. Durch den Entfall der Zielgeschwindigkeitsklassen sind die zugeordneten Streckenanteile den verbleibenden Geschwindigkeitsklassen zuzuweisen. Im gezeigten Beispiel ist der gesamte entfallene Streckenanteil exemplarisch in der verbliebenen Zielgeschwindigkeitsklasse mit dem zuvor größten Streckenanteil enthalten.

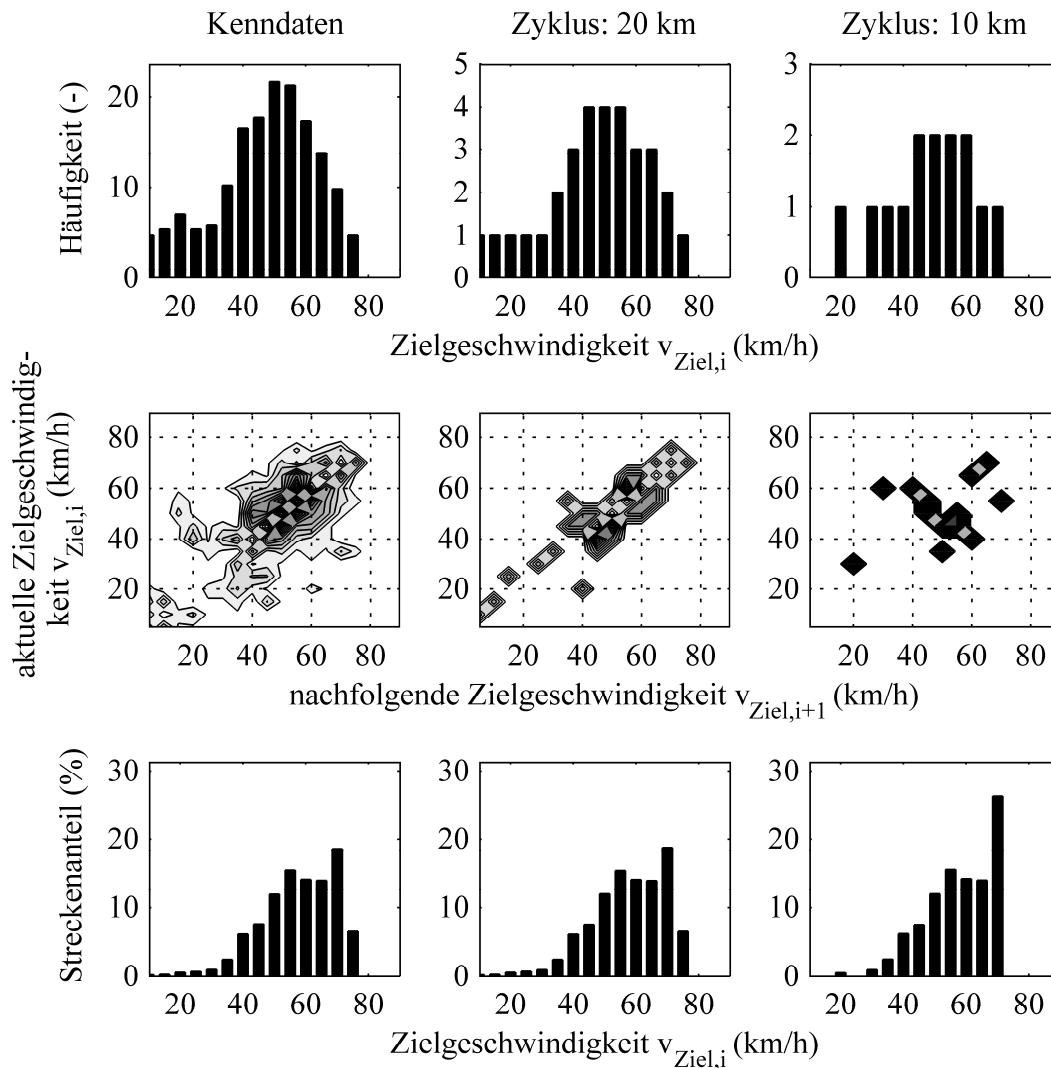


Bild 4.18: Vergleich der hinterlegten Kenndaten mit entsprechenden Charakteristiken erzeugter Zyklen unterschiedlicher Länge am Beispiel Stadt flach

Bei kurze Streckenlängen führt dies zu Abweichungen zwischen den hinterlegten Kenndaten und den Charakteristiken der erzeugten Geschwindigkeitsprofile. Dennoch spiegelt dies ein der Realität entsprechendes Verhalten wieder. Auch mit einer kurzen Realfahrt kann nicht das statistische Verhalten langer Fahrten mit allen vorkommenden Geschwindigkeiten, ihren Streckenanteilen und Geschwindigkeitswechseln nachgebildet werden.

4.4 Events

Als dritter und letzter Bestandteil der Fahrzyklen sind alle streckenbasierten Events in der chronologischen Reihenfolge ihres Auftretens automatisiert zu erzeugen. Für jedes Segment des Einsatzprofils wird eine separate Vorgabe entsprechend des Streckentyps, der Topographie und der Verkehrsdichte generiert. Die letztendliche Vorgabe aller Events ergibt sich durch die Aneinanderreihung der Einzelvorgaben. Bild 4.19 verdeutlicht das Vorgehen.

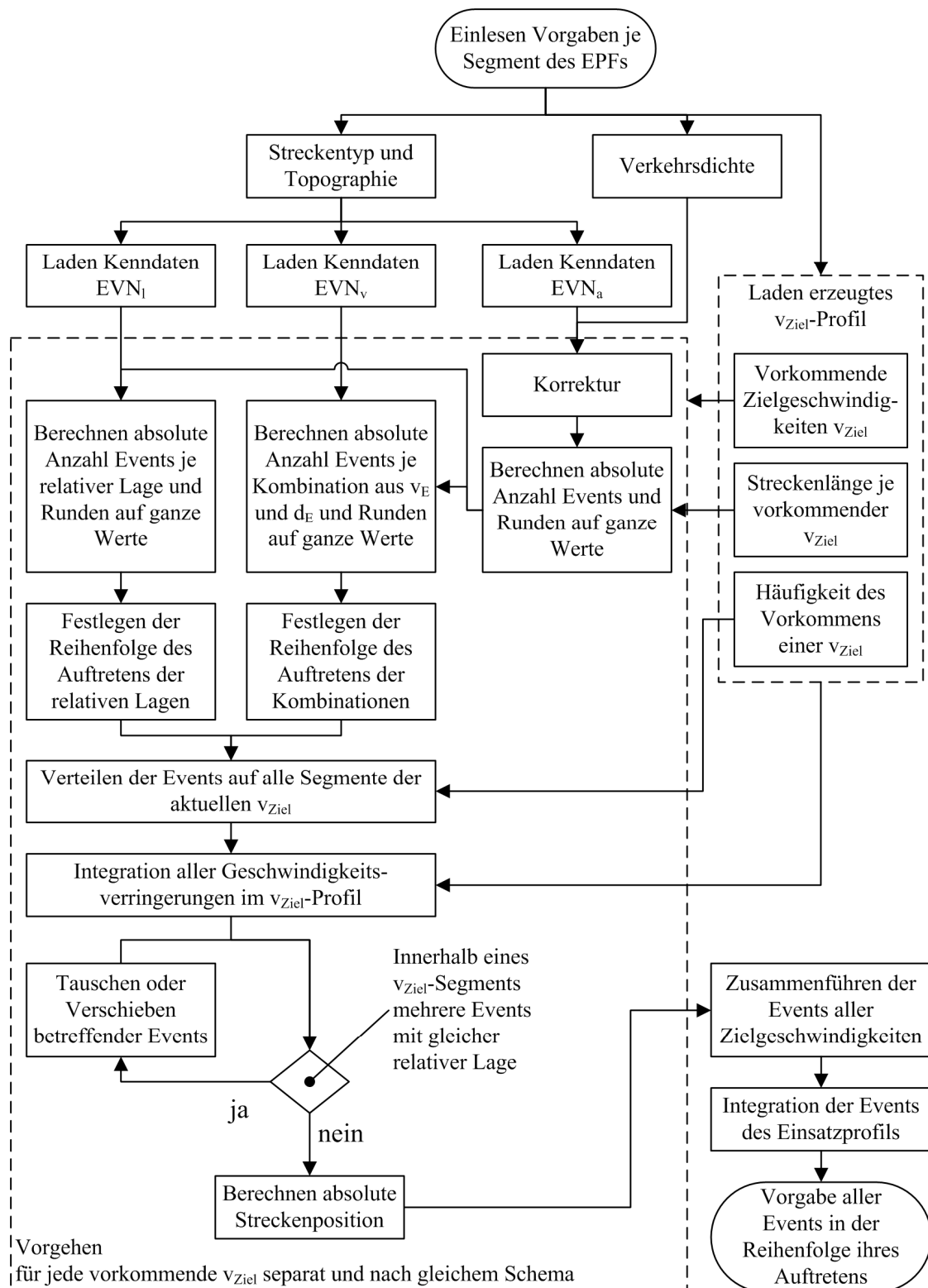


Bild 4.19: Vorgehen zur automatisierten Erzeugung der streckenbasierten Events für ein Segment des Einsatzprofils

Zu Beginn werden unter Einbeziehung des bekannten Streckentyps, der Topographie und der Verkehrsdichte die benötigten Kenndaten geladen. Dies sind die normierte Anzahl der Events je Zielgeschwindigkeitsklasse EVN_a pro 100km, die prozentuale Verteilung der Anzahl an

Events je Kombination aus Eventgeschwindigkeit und -dauer EVN_v , sowie die ebenfalls prozentuale Verteilung der Anzahl an Events je relativer Lage innerhalb eines einzelnen Zielgeschwindigkeitssegments EVN_l . Aus dem zuvor erzeugten Zielgeschwindigkeitsprofil sind darüber hinaus für das aktuelle Segment des Einsatzprofils alle vorkommenden Zielgeschwindigkeitsklassen sowie ihre jeweilige Häufigkeit und absolute Streckenlänge bekannt. Im weiteren Verlauf wird in einer Schleife für jede im erzeugten Zielgeschwindigkeitsprofil vorkommende Geschwindigkeitsklasse separat und mit jeweils identischem Vorgehen verfahren.

Für die jeweils aktuelle Zielgeschwindigkeitsklasse wird die Anzahl der Events pro 100km entsprechend der vorgegebenen Verkehrsdichte korrigiert. Hierzu werden über alle Zielgeschwindigkeitsklassen konstante Faktoren verwendet. Gemäß Kapitel 4.1.1 sind im vorliegenden Fall alle zur Ableitung der Kenndaten vorhandenen Messdaten der normalen Verkehrsdichte zugewiesen. Abweichende Verkehrsdichten werden über eine verringerte (geringe Verkehrsdichte) bzw. erhöhte (hohe Verkehrsdichte) Anzahl an Events pro Strecke abgebildet. Beim Vorhandensein von Mess- und damit auch Kenndaten für unterschiedliche Verkehrsdichten kann dieser Schritt entfallen.

Die anhand der Verkehrsdichte korrigierte Anzahl an Events pro 100km und die Streckenlänge der aktuellen Zielgeschwindigkeitsklasse gehen anschließend in die Bestimmung der absoluten Anzahl an Events ein. Diese ist auf ganze Werte zu runden, da im Fahrzyklus nur ganzzahlige Werte eine plausible Angabe für Events darstellen. Mit der ermittelten Anzahl an Events lassen sich aus den prozentualen Verteilungen der Anzahl an Events je Kombination von Eventgeschwindigkeit und -dauer EVN_v , sowie je relativer Lage EVN_l die entsprechenden absoluten Verteilungen berechnen, die ebenfalls zu runden sind.

Im nächsten Schritt ist die Reihenfolge der Events festzulegen. Dies basiert auf einem Algorithmus analog der Sortierung der Zielgeschwindigkeitssegmente (vgl. Bild 4.17). Ausgangspunkt der Sortierung sind die absoluten Verteilungen der Anzahl an Events je Eventgeschwindigkeit- und -dauer sowie relativer Lage. Die beiden entsprechenden Matrizen werden für sich in einem iterativen Vorgehen jeweils ausgehend von der größten enthaltenen Anzahl abgearbeitet, bis alle Events mit ihren zugewiesenen Eigenschaften in der Reihenfolge des Auftretens notiert sind. Durch das sequentielle Schreiben der Informationen erfolgt indirekt eine Zuordnung der relativen Lage, Geschwindigkeit und Dauer je Event. Das Ergebnis der Sortierung ist eine Vorgabe aller Events in der chronologischen Reihenfolge ihres Auftretens mit den jeweiligen Informationen zur Eventgeschwindigkeit und -dauer sowie zur relativen Lage.

Mit dem bekannten Zielgeschwindigkeitsprofil lassen sich die Events in der zuvor gefundenen Reihenfolge möglichst gleichmäßig auf die enthaltenen Zielgeschwindigkeitssegmente verteilen. Ergänzend werden alle Geschwindigkeitsverringerungen im Zielgeschwindigkeitsprofil als Event extrahiert und in die vorab erzeugten Events integriert. Ziel ist die einheitliche Behandlung aller Geschwindigkeitsverringerungen in der Simulation durch das Fahrermodell. Da ent-

sprechende Events in der Datenauswertung zur Ableitung der Kenndaten keine Berücksichtigung finden (vgl. Kapitel 4.1.2), stellt dieses Vorgehen keine nachträgliche Veränderung oder Abweichung zu den Kenndaten dar.

Nach erfolgter Verteilung und Integration sind alle Events innerhalb eines Zielgeschwindigkeitssegments auf gleiche relative Lagen zu überprüfen. Bei einer Übereinstimmung lägen die Events an gleicher Streckenposition und würden sich überlagern. Entsprechende Events sind mit Events in anderen Zielgeschwindigkeitssegmenten zu tauschen. Sind auch hierdurch identische relative Lagen nicht vermeidbar, werden diese ohne nennenswerte Änderung der Kenndaten um wenige Prozent manipuliert. Abschließend kann aus den relativen Lagen und der Kenntnis des Zielgeschwindigkeitsprofils die absolute Streckenposition aller Events berechnet werden.

Der separaten Generierung der Events für alle Zielgeschwindigkeitsklassen folgen das Zusammenführen der Einzelvorgaben und die Integration der Events aus dem Einsatzprofil, also den Be- und Entladevorgängen sowie Pausen. Die letztendliche Vorgabe beinhaltet damit alle vorkommenden Events in der chronologischen Reihenfolge ihres Auftretens und umfasst die automatisiert erzeugten Events in den Fahrsegmenten des Einsatzprofils, die extrahierten Verringerungen der ebenfalls automatisiert erzeugten Zielgeschwindigkeit und die direkt im Einsatzprofil vorgegebenen Be- und Entladevorgänge sowie Pausen.

Analog zur Erzeugung des Zielgeschwindigkeits- und Steigungsprofils hat die Streckenlänge einen signifikanten Einfluss auf die Charakteristiken der erzeugten Events und ihre Übereinstimmung mit den hinterlegten Kenndaten. Insbesondere für kurze Streckenlängen wird das durch die Kenndaten beschriebene Verhalten nur angenähert nachgebildet. Dies trifft besonders dann zu, wenn bereits bei der Erzeugung des Zielgeschwindigkeitsprofils durch Skalierungs- und Rundungseffekte gewisse Zielgeschwindigkeitsklassen, ihre Streckenanteile und damit auch die bei diesen auftretende Events entfallen sind.

4.5 Exemplarische Fahrzyklen

Abschließend zeigen Bild 4.20 und Bild 4.21 zwei Fahrzyklen, die unter Anwendung der vorgestellten Methode für die beiden Einsatzprofile des Verteilerverkehrs und des Fernverkehrs nach Bild 3.3 erzeugt wurden. Im oberen Teil ist jeweils das Zielgeschwindigkeitsprofil mit allen überlagerten Events und im unteren Teil das Steigungsprofil gezeigt. Die vollständigen Fahrzyklen umfassen jeweils die aneinandergefügteten Teilzyklen der einzelnen in den Einsatzprofilen definierten Segmente.

In den erzeugten Fahrzyklen sind anhand des Zielgeschwindigkeitsprofils bzw. der jeweiligen Geschwindigkeitswerte die zugrunde liegenden Segmente und Streckenarten des Einsatzprofils gut zu identifizieren. Im Zyklus des Verteilerverkehrs (Bild 4.20) korrespondieren die hohen Geschwindigkeiten zum Beginn, zur Mitte und zum Ende mit den Autobahnsegmenten des Ein-

satzprofils. Dazwischen liegen die Stadtsegmente, die sich zwischen den im Einsatzprofil definierten Entladevorgängen zyklisch wiederholen. Nach der vorgestellten Methode wirkt sich die in der zweiten Hälfte des Einsatzprofils als hoch definierte Verkehrsdichte nicht auf die Gestalt der Zielgeschwindigkeitsprofile aus. Dementsprechend stimmen die Zielgeschwindigkeitsprofile der Stadtsegmente bei normaler (vor dem mittleren Autobahnsegment) und hoher Verkehrsdichte (nach dem mittleren Autobahnsegment) überein. Bei der hohen Verkehrsdichte ist lediglich die Anzahl an Events gegenüber der normalen Verkehrsdichte erhöht.

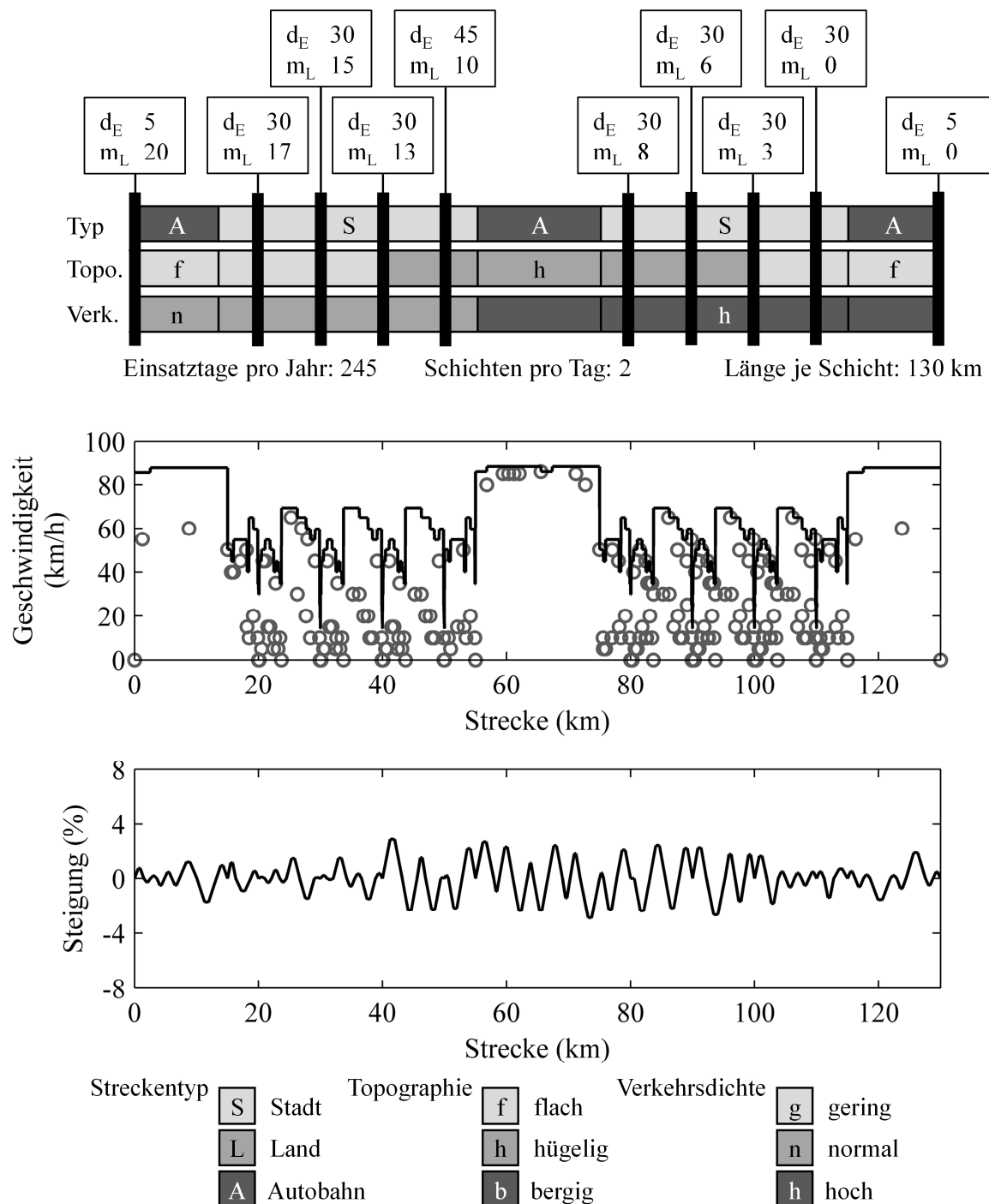


Bild 4.20: Erzeugter Fahrzyklus für das exemplarische Einsatzprofil „Verteilerverkehr“

Die im Einsatzprofil über Events definierten Be- und Entladevorgänge oder Pausen sind in der grafischen Darstellung des Fahrzyklus nicht mehr als solche erkennbar. Sie sind zwecks einheitlicher Behandlung durch das Fahrermodell in der Simulation in die automatisiert erzeugten Events im Fahrbetrieb integriert. Im Steigungsprofil lässt sich anhand der vorkommenden Steigungswerte die zur Mitte als hügelig definierte gegenüber der ansonsten flachen Topographie abgrenzen.

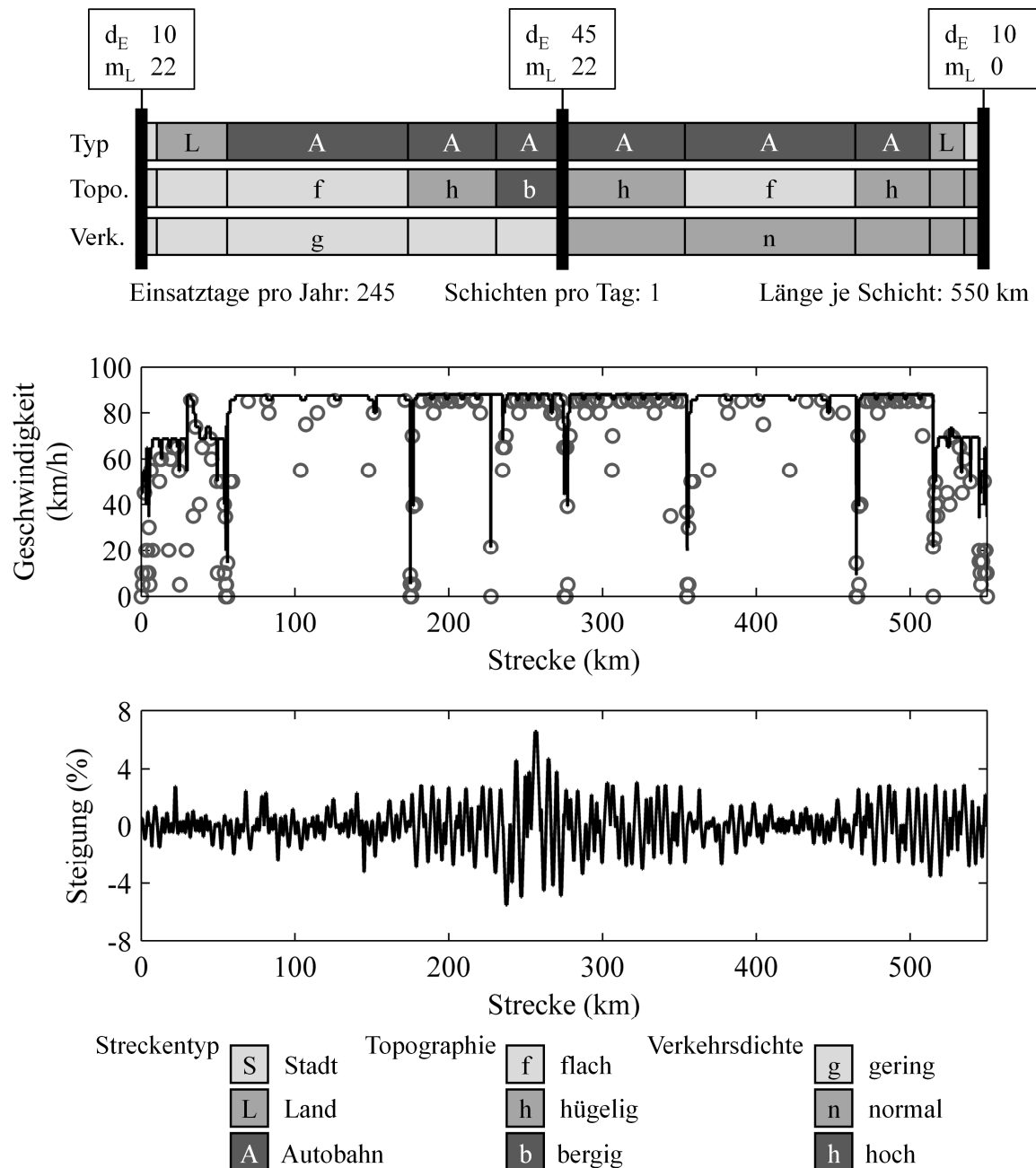


Bild 4.21: Erzeugter Fahrzyklus für das exemplarische Einsatzprofil „Fernverkehr“

Auch im Zyklus des Fernverkehrs (Bild 4.21) sind im Steigungsprofil die hügeligen bis bergigen Segmente des Einsatzprofils gegenüber den flachen deutlich abgrenzbar. Am Beginn und Ende des Fahrzyklus korrespondieren die im Vergleich zum überwiegenden Autobahnanteil geringeren Zielgeschwindigkeitswerte mit den Landstraßen- und Stadtsegmenten. Im erzeugten

Zielgeschwindigkeitsprofil der Autobahnsegmente weisen die Streckenabschnitte mit hügeliger und bergiger Topographie ein ungleichförmigeres Verhalten als bei flacher Topographie auf. Es treten vermehrt geringfügige Geschwindigkeitswechsel unterhalb der maximalen Zielgeschwindigkeit auf und die Anzahl der Events ist im Vergleich zur flachen Topographie bei identischer Verkehrsdichte erhöht. Bei der Ableitung der Kenndaten wurden Steigungseinflüsse bzw. Geschwindigkeitseinbrüche an Steigungen aufgrund einer Untermotorisierung eliminiert und sind demnach nicht in das erzeugte Zielgeschwindigkeitsprofil eingegangen. Stattdessen ist der beschriebene Effekt unabhängig von der Steigung auf ein ungleichmäßigeres Verhalten in den gemessenen und zur Ableitung der Kenndaten verwendeten Geschwindigkeitsverläufen bei anspruchsvollerer Topographie zurückzuführen.

Im folgenden Kapitel werden die entwickelte Methode und die erzeugten einsatzindividuellen Fahrzyklen zur Bewertung der Bremsenergierückgewinnung am Kühlsattelaufleger angewandt.

5 Validierung und Anwendung der Methode

Die Bremsenergierückgewinnung zur elektrischen Versorgung von Kühlaggregaten stellt eine Möglichkeit zur Verringerung des Primärenergiebedarfs und der Emissionen von Kühlsattelaufliegern dar. Erreichbare Einsparungen hängen neben der Dimensionierung des Energierückgewinnungssystems wesentlich vom Einsatzprofil des Fahrzeugs ab. Aus diesem Grund werden die entwickelte Methode und die erzeugten einsatzindividuellen Fahrzyklen zur Bewertung und Dimensionierung eines Bremsenergierückgewinnungssystems am Kühlsattelaufleger angewandt. Zwecks Validierung der Methode und des benötigten Simulationsmodells sind einleitend durchgeführte Feldversuche mit den zugehörigen Messergebnissen beschrieben. Nach dem Abgleich von Simulation und Messung folgt die weitergehende Anwendung der Methode in Analysen zur Systemdimensionierung für realistische Einsatzprofile.

5.1 Feldversuche mit Kühlsattelaufleger

Um die energetischen Potentiale einer Bremsenergierückgewinnung am Kühlsattelaufleger in Versuchsfahrten zu ermitteln und aufzuzeigen, die Realisierbarkeit eines entsprechenden Systems nachzuweisen und die Grundlagen für weitere Entwicklungsaktivitäten zu schaffen, wurde das Gemeinschaftsforschungsprojekt „Electric powered Energy-Efficient Trailer“ (E³-Trail) initiiert und von Dezember 2009 bis Juni 2013 durchgeführt. Das Projekt wurde vom Land Niedersachsen unter dem Kennzeichen W3-80114483 gefördert. Durch die beteiligten Partner wurde ein Versuchsträger spezifiziert und aufgebaut, der für Messfahrten und zur Potentialbestimmung Verwendung fand. Die im Projekt gewonnenen Messergebnisse bilden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Grundlage zur Validierung des verwendeten Simulationsmodells sowie der gesamten Methode und der erzeugten Fahrzyklen. Nach Vorstellung des Versuchsträgers folgt eine Beschreibung ausgewählter Messfahrten und der zugehörigen Messergebnisse. Weitergehende Informationen können [Dop13b], [Dop13a] oder [Lie13] entnommen werden.

5.1.1 Technisches Konzept des Versuchsträgers

Beim aufgebauten Versuchsträger (s. Bild 5.1) handelt es sich um einen schweren Kühlsattelaufleger. Das Basisfahrzeug ist ein KRONE Cool Liner SDR 27 eL4-S mit teilselbsttragendem Kofferaufbau und Wänden aus Paneelen mit Stahldeckschicht [KRO16]. Das installierte Kühlaggregat VECTOR 1550 stammt vom Hersteller Carrier Transicold [CAR16]. Es ist ein Aggregat der mittleren Leistungsklasse mit einer dieselmotorischen Energieversorgung und zusätzlicher Anschlussmöglichkeit an das 3-Phasen Drehstromnetz. Nach Erkennung einer anliegenden stabilen Netzspannung wechselt das Kühlaggregat automatisch vom dieselmotorischen Betrieb in den elektrischen Netzbetrieb. Zusätzlich ist das Basisfahrzeug mit einer Telematikeinheit ausgerüstet. Neben der üblicherweise genutzten mobilen Funkdatenübertragung besteht über eine serielle Schnittstelle die Möglichkeit zur Ausgabe von Temperaturen (außen/innen), Türöffnungen und Betriebszuständen und -daten des Kühlaggregats.



Bild 5.1: Aufgebauter Versuchsträger mit Zugmaschine [Dop13b]

Das konventionelle Basisfahrzeug wurde um ein Energierückgewinnungssystem zur elektrischen Versorgung des Kühlaggregats erweitert. Das System besteht aus zwei Generatoren, die sich an der zweiten und dritten Achse des Aufliegers befinden, den beiden erforderlichen Frequenzumrichtern, einer Lithium-Ionen Batterie und einem Steuerungssystem. Das Kühlaggregat ist über die ursprünglich für den Netzbetrieb vorgesehene Steckdose und einen weiteren Umrichter an das System angebunden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Batterie im Stillstand des Fahrzeugs über das 3-Phasen Drehstromnetz zu laden. Mit Ausnahme der Generatoren sind alle zusätzlichen Komponenten in den verstärkten Palettenkästen des Fahrzeugs untergebracht. Die realisierte Systemstruktur ist Bild 5.2 zu entnehmen.

Zentraler Bestandteil des elektrischen Systems ist der Gleichspannungszwischenkreis mit einer Nennspannung von 660 VDC. An diesen sind die beiden Achsgeneratoren über jeweils einen AC/DC-Umrichter angebunden. Die Generatoren sind Asynchronmaschinen (ASM) mit einer Nennleistung von jeweils 35 kW und einer Spitzenleistung von 60 kW bei einer Betriebsspannung von 380 VAC. Die beiden zugehörigen Frequenzumrichter haben jeweils eine Nennleistung von 65 kW und eine Spitzenleistung von 100 kW. Mechanisch sind die achsmittig angebrachten Generatoren über jeweils ein Differential mit fester Getriebeübersetzung mit den beiden Rädern der entsprechenden Achse verbunden. Durch die Getriebestufe wird die Raddrehzahl mit einer Übersetzung von 8,2 ins Schnelle übersetzt. Im Betrieb des Versuchsträgers wurde das Drehmoment aus Gründen der mechanischen Festigkeit der Welle zwischen Differential und Rad auf einen Wert von maximal 900 Nm pro Achse bzw. 450 Nm pro Rad begrenzt. Die sich einstellende maximale mechanische Brems- und Rückgewinnungsleistung beträgt damit 86 kW auf Fahrzeugebene bei einer Fahrgeschwindigkeit von 89 km/h und einem dynamischen Reifenradius von 0,52 m. Ebenfalls aus Festigkeitsgründen wurde die Rate des Drehmomentanstiegs nach Einschalten der Generatoren limitiert. Sowohl die Achsgeneratoren

als auch die zugehörigen Umrichter sind flüssigkeitsgekühlt, was die Integration eines entsprechenden Kühlsystems erforderte.

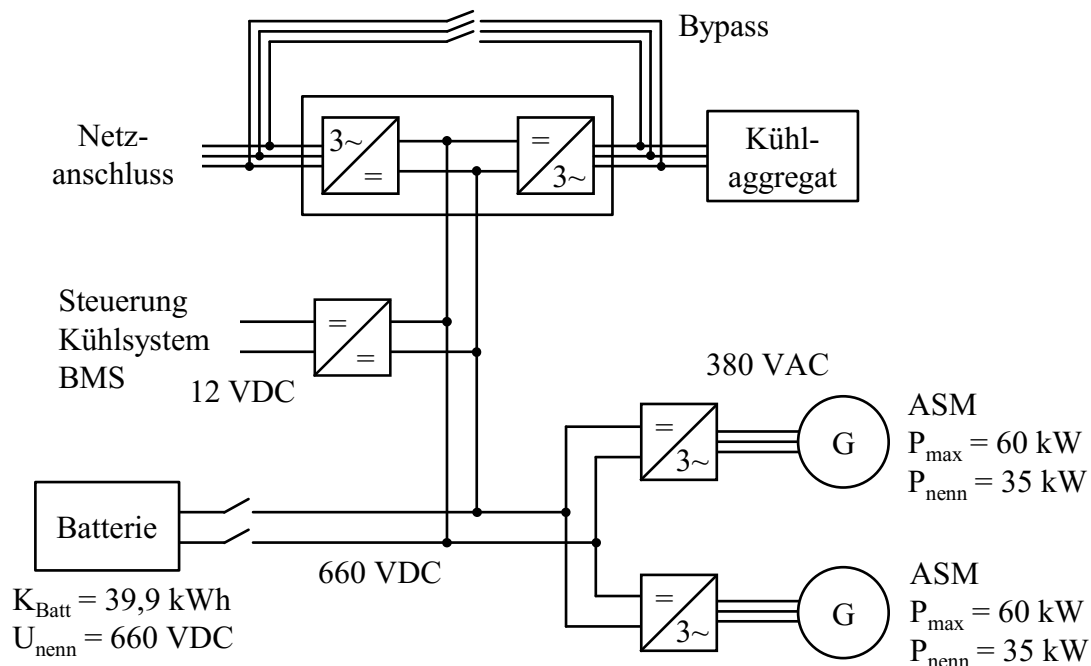


Bild 5.2: Struktur des elektrischen Systems des im Projekt E³-Trail aufgebauten Versuchsträgers (nach [Dop13b])

Über einen dritten an den Zwischenkreis angeschlossenen bidirektionalen Umrichter wird zum einen das Kühlaggregat während der Fahrt elektrisch versorgt und zum anderen die Batterie im Stillstand über das externe Stromnetz geladen. Im letztgenannten Fall ist das Kühlaggregat über einen Bypass direkt mit dem Netz verbunden. Notwendige Nebenverbraucher, wie bspw. das Steuerungs- und Batteriemanagementsystem (BMS) oder die Komponenten des Flüssigkeitskühlsystems, sind ebenfalls über DC/DC-Spannungswandler an den Zwischenkreis angebunden. Die Summe aller in den Zwischenkreis eingespeisten und entnommenen Leistungen führt zur Ladung bzw. Entladung der Batterie. Diese besteht auch 200 in Reihe geschalteten Zellen des Typs LiFePO₄/LiFeYPO₄ mit einer Kapazität von 60 Ah pro Zelle. Bei der Batterienennspannung von 660 VDC ergibt sich damit eine Kapazität von 39,9 kWh. Das System des Versuchsträgers verfügt über zwei grundsätzliche Betriebsmodi.

1. Fahrbetrieb: Liegt die Batteriespannung unterhalb einer oberen Grenzspannung (die Batterie ist nicht vollständig geladen), kann Bremsenergie zurückgewonnen und in den Zwischenkreis eingespeist werden. Andernfalls ist vollständig über die konventionellen Bremsenrichtungen des Fahrzeugs zu verzögern. Unabhängig davon ist bei ausreichendem Ladezustand der Batterie eine elektrische Versorgung des Kühlaggregats möglich. Die Summe der eingespeisten und entnommenen Ströme lädt oder entlädt die Batterie.

2. Netzbetrieb: Beim Anschluss an ein externes Stromnetz wird das Kühlaggregat ohne Belastung des elektrischen Fahrzeugsystems direkt über den Bypass versorgt. Die Leistungsaufnahme des Kühlaggregats wird gemessen und die restliche vom Netz bereitgestellte Leistung zur Ladung der Batterie genutzt.

Auf eine automatische Zu- und Abschaltung der Generatoren zur Bremsenergieerückgewinnung in Roll-, Brems- oder Verzögerungsphasen wurde aufgrund der Systemkomplexität und der erforderlichen Vernetzung mit der Zugmaschine und dem Bremssystem am Trailer verzichtet. Stattdessen ist über einen am Lenkrad befestigten Taster die Energieerückgewinnung vom Fahrer manuell einzuschalten, was prinzipiell der Aktivierung der Dauerbremseinrichtung der Zugmaschine gleichkommt. Im Versuchsbetrieb stellte sich dies als problemlos möglich und praktikabel heraus. Zur weiteren Bedienung des Systems und zur Visualisierung von Systemzuständen während der Fahrt ist in der Kabine der Zugmaschine eine separate Bedieneinheit mit Monitor untergebracht. Die Kommunikation zwischen allen Komponenten des elektrischen Systems sowie der Bedieneinheit ist über einen eigenständigen CAN-Bus realisiert. Im Rahmen des Projekts konnten mit dem Versuchsträger die angestrebten Ergebnisse in zufriedenstellender Weise gewonnen werden. Eine Auswahl an Messergebnissen gibt das folgende Kapitel wieder.

Dennoch verfügt der Systemaufbau über spezifische Besonderheiten mit Auswirkungen auf die zurückgewinnbaren Energiemengen. So wird der Generator unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit oder Raddrehzahl mit einem konstanten maximalen Drehmoment betrieben. Dies führt zu einer linearen Abhängigkeit der Rückgewinnungsleistung von der Fahrgeschwindigkeit. Die maximale Leistung wird lediglich bei maximaler Geschwindigkeit erreicht. Insbesondere bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten steht somit nur ein Bruchteil der Maximalleistung zur Verfügung. Zusätzlich führt die angesprochene Limitierung des Drehmomentanstiegs nach dem Einschalten der Generatoren insbesondere bei kurzen Rückgewinnungsvorgängen zu einem nicht vollständigen Ausnutzen des theoretischen Systempotentials. Das Drehmomentmaximum wird erst fünf Sekunden nach Einschalten der Generatoren erreicht, sodass bei Bremsvorgängen kürzer fünf Sekunden nicht das volle Drehmoment zur Verfügung steht.

Beide Umstände verdeutlicht Bild 5.3 für zwei exemplarische Energieerückgewinnungsvorgänge. Die obere Grafik zeigt einen Verzögerungsvorgang von ca. 40 km/h auf Null und die untere einen Bremsvorgang bei Bergabfahrt mit annähernd konstanter Fahrgeschwindigkeit. Dargestellt sind jeweils die von den Umrichtern der Achsgeneratoren in den Zwischenkreis eingespeiste wirkungsgradbehaftete elektrische Rückgewinnungsleistung P_{ER} und die zugeordnete Energie E_{ER} . Die Rückgewinnungsleistung ist das Produkt aus der Zwischenkreisspannung und dem gleichgerichteten Strom der beiden Achsgeneratoren.

$$P_{ER} = U_{ZWK} I_{Gen} \quad (5.1)$$

$$E_{ER} = \int P_{ER} dt \quad (5.2)$$

In beiden Fällen ist der fünf Sekunden dauernde Leistungs- bzw. Drehmomentanstieg nach Aktivierung der Bremsenergierückgewinnung deutlich erkennbar. Für den Verzögerungsvorgang bis zum Fahrzeugstillstand geht die Rückgewinnungsleistung mit der Fahrgeschwindigkeit bis auf null zurück. Beim Bremsvorgang im Gefälle weist die elektrische Leistung zwischen ca. 10 und 15 Sekunden das theoretisch mögliche Maximum auf. Bis zum Ende des Bremsvorgangs wird die Leistung aufgrund der zeitlich beschränkten Energieaufnahmefähigkeit der Batterie verringert.

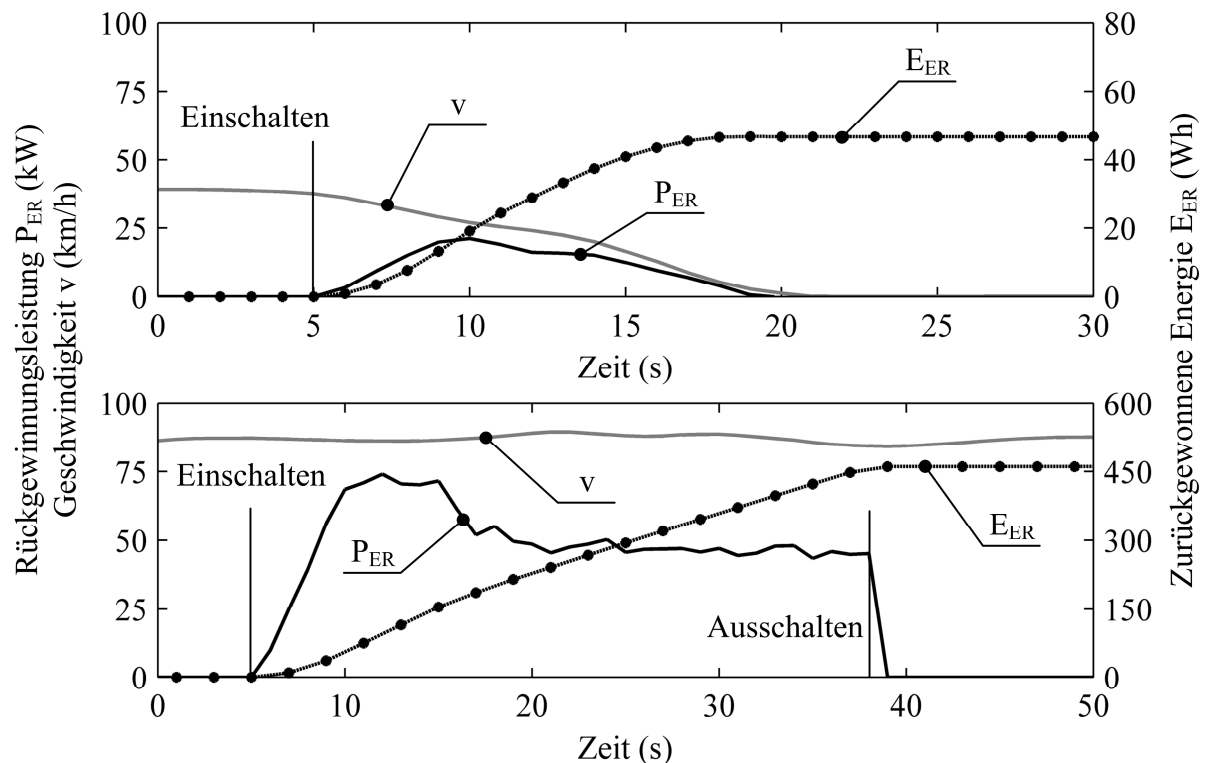


Bild 5.3: Exemplarische Energierückgewinnungsvorgänge - Verzögerung bis Fahrzeugstillstand (oben) und Bremsung bei Bergabfahrt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit (unten)

5.1.2 Messmethodik und Messfahrten

Zwecks Ermittlung der zurückgewinnbaren Energiemengen in Abhängigkeit typischer Fahrstrecken und Beladungen wurden verschiedene Rundstrecken mit unterschiedlicher Topographie und Beladung jeweils mehrmals befahren. Zur automatischen Datenaufnahme während der Messfahrten wurde der Versuchsträger mit einem Messsystem ausgerüstet. Die Mess- und Steuerdaten des elektrischen Systems stehen auf dem internen CAN-Bus zur Verfügung und wurden vom System erfasst und gespeichert. Hierzu zählen u.a. Spannungen, Ströme und Temperaturen an allen Umrichtern (Achse und Kühlaggregat), die Temperatur der Achsgeneratoren, Daten der Batterie (Klemmenspannung, Zelltemperatur, Ladezustand, Lade-/Entladestrom) und nicht zuletzt die Fahrereingaben. Zusätzlich zeichnete das Messsystem die aktuelle GPS-Position inkl. Geschwindigkeit, Richtung und Höhe auf. Mit zwei Strommessumformer wurde der

Strom an den Umrichtern der Achsgeneratoren gemessen und ebenfalls aufgezeichnet. Zusätzlich wurden über die serielle Schnittstelle zur Telematikeinheit des Trailers Daten gelesen und mitgeschrieben. Diese beinhalten u.a. die Messdaten der im Kühlkoffer eingebauten Temperatursensoren, den Türöffnungszustand sowie Betriebsdaten des Kühlaggregats wie den gewählten Betriebsmodus, die eingestellte Soll-Innentemperatur oder die Betriebsstunden.

Für die vorliegende Untersuchung sind insbesondere die zurückgewonnenen Energiemengen relevant. Aufgrund der Wirkungsgrade im System sind die gemessene elektrische Rückgewinnungsleistung und die entsprechenden Energiemengen kleiner als die entsprechenden mechanischen Größen auf Radniveau. Demgegenüber ist der messtechnische und konstruktive Aufwand zur Erfassung der elektrischen Größen deutlich geringer als derjenige zur Erfassung der mechanischen Leistung bzw. des Drehmoments.

Tabelle 5.1: Auswahl genutzter Rundstrecken zur Bestimmung der zurückgewinnbaren Energiemengen

Bezeichnung	Zuladung	Beschreibung Rundstrecke
Stadt flach	10 t 20 t	Ort: Industrie- und Stadtgebiet Bremen Länge: ca. 65 km Zusammensetzung: 75 % Stadt flach, 25 % Autobahn flach
Land flach	10 t 20 t	Ort: Emsland - Werlte und Umgebung Länge: ca. 70 km Zusammensetzung: 100 % Land flach
Land hügelig	10 t	Ort: Fulda-Marburg-Diemelstadt Länge: 97 km Zusammensetzung: 45 % Land hügelig, 55 % Land flach
Autobahn flach	10 t 20 t	Ort: Norddeutschland - Werlte, Rheine, Bremen, Leer Länge: ca. 445 km Zusammensetzung: 73 % BAB flach, 27 % Land flach
Autobahn bergig	10 t	Ort: Kassel-Fulda Länge: 102 km Zusammensetzung: 60 % BAB bergig, 40 % BAB hügelig

Eine Auswahl der zur Ermittlung der zurückgewinnbaren Energiemengen gewählten und gefahrenen Rundstrecken mit der jeweils verwendeten Zuladungsmasse gibt Tabelle 5.1 wieder. Jede Strecke ist charakterisiert durch eine vorherrschende Streckenart und Topographie, kann allerdings auch abweichende Eigenschaften aufweisen. Die Einteilung der Streckenanteile in die genannten Topographieklassen entspricht den Ausführungen nach Kapitel 4.1.1.

Das Fahrzeug wurde während der Versuchsfahrten durch verschiedene Testfahrer mit langjähriger Erfahrung bewegt. Die Fahrer wurden zu einer durchschnittlichen, also weder besonders sparsamen noch aggressiven, Fahrweise angehalten. Aufgrund der nicht vorhandenen Vernetzung des elektrischen Systems mit dem Bremssystem des Trailers und den Steuergeräten der Zugmaschine erfolgte wie beschrieben die Aktivierung und Deaktivierung der Generatoren in Fahrsituationen mit Energierückgewinnungspotential manuell. So konnten sowohl Rollphasen als auch tatsächliche Brems- und Verzögerungsvorgänge mit Nutzung der Betriebs- und Dauerbremsen zur Bremsenergieerückgewinnung genutzt werden. Vor und während jeder Messfahrt wurde über den elektrischen Betrieb des Kühlaggregats ein ausreichend geringer Ladezustand der Batterie gewährleistet, sodass zu jedem Zeitpunkt Bremsenergie zurückgewonnen und der Einfluss der begrenzten Batteriekapazität auf die zurückgewinnbaren Energiemengen eliminiert werden konnte.

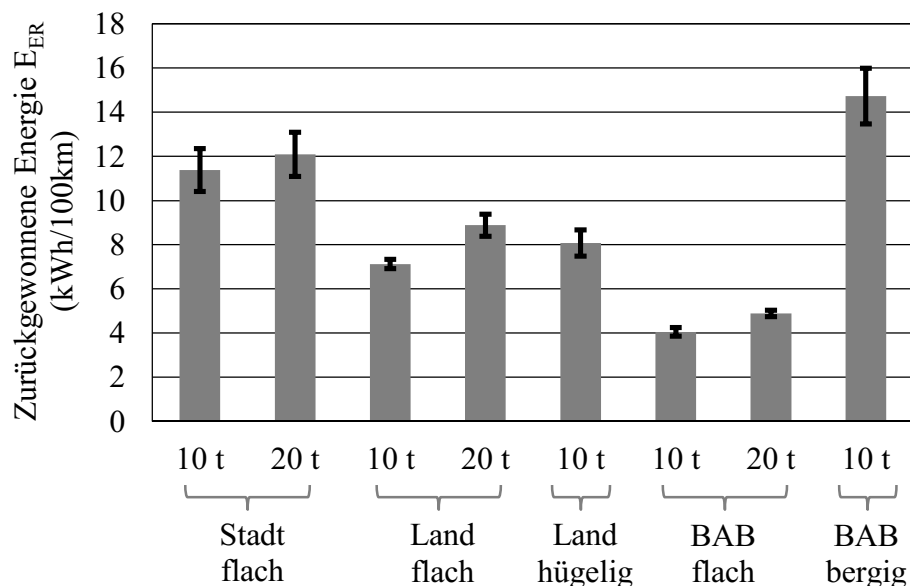


Bild 5.4: Messergebnisse hinsichtlich zurückgewonnener Energiemengen auf ausgewählten Rundstrecken mit unterschiedlicher Beladung

Die je Rundstrecke zurückgewonnene Bremsenergiemenge fasst Bild 5.4 zusammen. Zwecks Vergleichbarkeit sind die Energiemengen auf eine einheitliche Fahrstrecke von 100 km normiert. Dargestellt sind jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung aller gefahrenen Wiederholungen für eine Rundstrecke und Beladung. Erwartungsgemäß weisen die städtische und die bergige Rundstrecke das jeweils höchste Energierückgewinnungspotential pro zurückgelegter Strecke auf. Allgemein kann mit höherer Beladung mehr Bremsenergie zurückgewonnen werden, was auf eine an die Masse und die mit dieser einhergehenden höheren erforderlichen Bremsleistung angepasste Fahrweise mit längeren Bremswegen und Verzögerungszeiten zurückzuführen ist. In Gefällssituationen tritt zudem der Zustand des Rollens und Schubbetriebs aufgrund der proportional mit der Masse steigenden Hangabtriebskraft eher ein, was ebenfalls zu längeren Zeitanteilen mit Möglichkeit zur Energierückgewinnung führt.

Ein im Fahrzeugstillstand mit leerem Kühlkoffer erzeugter Messschrieb verdeutlicht die Größenordnung der elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlaggregats (s. Bild 5.5). Die Messung wurde bei einer näherungsweise konstanten Außentemperatur von 17°C durchgeführt. Die Solltemperatur im Kühlkoffer wurde auf -20°C eingestellt, was zu einer wirksamen Temperaturdifferenz von -37 K führte. Nach dem Einschalten und der initialen Abkühlphase wurde das Kühlaggregat zunächst im Intervallbetrieb als Zweipunktregler betrieben. In den tatsächlichen Kühlphasen betrug die elektrische Leistungsaufnahme etwa $6,5\text{ kW}$ und über die gesamte Dauer des Intervallbetriebs gemittelt etwa $2,6\text{ kW}$. Etwa 350 Minuten nach Messbeginn wurde manuell in den Dauerlaufbetrieb gewechselt. In diesem wird bedarfsgerecht Kälteleistung erzeugt und die Güte der Temperaturregelung stark verbessert. Dabei ist die mittlere elektrische Leistungsaufnahme mit $4,8\text{ kW}$ jedoch deutlich höher als im Intervallbetrieb. Die durchgeführte Messung stellt lediglich einen Betriebsfall dar und ist zudem nur für das eingesetzte Kühlaggregat gültig. Dennoch lässt sich aus dem Ergebnis eine Größenordnung hinsichtlich der elektrischen Leistungsaufnahme für weitere Analysen ableiten (vgl. Kapitel 5.4).

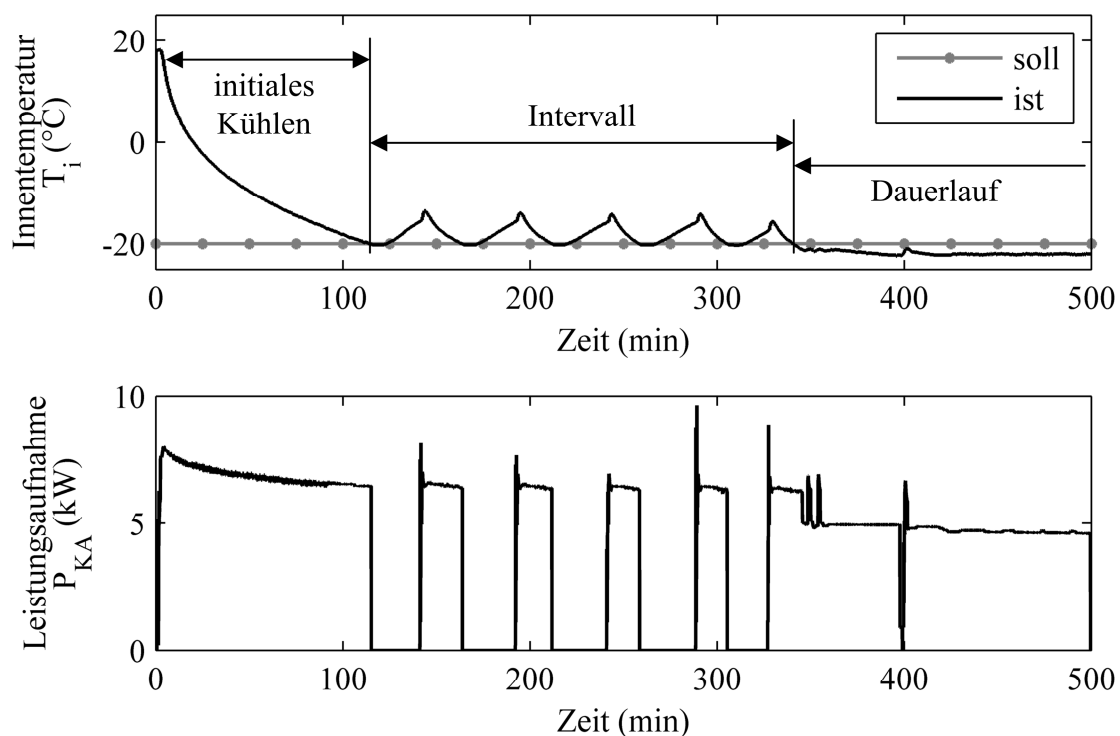


Bild 5.5: Elektrische Leistungsaufnahme Kühlaggregat im Fahrzeugstillstand, leerer Kühlkoffer, Außentemperatur ca. 17°C

Zusätzlich kann in Kombination mit den Messdaten zur Energierückgewinnung abgeschätzt werden, ob während der Messfahrten auf den gewählten Rundstrecken ein rein elektrischer Betrieb des Kühlaggregats möglich wäre. Auf der Autobahn-Strecke mit 20 t Zuladung wurden beispielsweise im Mittel etwa $4,9\text{ kWh}/100\text{ km}$ elektrische Energie in den Zwischenkreis eingespeist (s. Bild 5.4). Die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit betrug während der Messfahr-

ten rund 64 km/h, womit sich die Energierückgewinnung pro Stunde auf etwa 3,14 kWh/h belief. Mit einem angenommenen Gesamtwirkungsgrad von 80 % für die Speicherung in der Batterie und die DC/AC-Wandlung im Umrichter zum Anschluss des Kühlaggregats wäre damit die rein elektrische Versorgung eines Aggregats mit einer mittleren elektrischen Leistungsaufnahme von maximal 2,51 kW möglich. Für die Stadt-Rundstrecke mit 10 t Zuladung und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 41 km/h könnte die mittlere elektrische Leistungsaufnahme des Aggregats maximal 3,73 kW bei einer Energierückgewinnungsrate von 11,4 kWh/100km betragen.

Diese einfachen Überschlagsrechnungen verdeutlichen, dass für eine realitätsnahe einsatzindividuelle Bewertung eines entsprechenden Systems neben dem reinen Fahrbetrieb auch zeit- und energiebeanspruchende sowie die Durchschnittsgeschwindigkeit beeinflussende Be- und Entladevorgänge sowie Pausen zu berücksichtigen sind.

5.2 Realisierung des Simulationsmodells

Im entwickelten Ansatz wird die Methode der Simulation zur Ermittlung der angestrebten Ergebnisse und Bewertungskriterien angewandt. Die erzeugten Fahrzyklen sind dabei im Sinne einer Fahraufgabe durch ein Fahrermodell in Zusammenspiel mit dem Modell des betrachteten Fahrzeugs umzusetzen. Die Gesamtsimulation ist demnach als Vorwärtssimulation realisiert, in der sich die Drehmomente an den Antrieben und Verzögerungseinrichtungen des Fahrzeugs, zu denen auch das Energierückgewinnungssystem am Sattelaufleger zählt, aus den Vorgaben des Fahrermodells ergeben. Eine Übersicht dieses Berechnungsablaufs zeigt Bild 5.6. Das Gesamtmodell wurde in MATLAB Simulink realisiert und bildet die Längsdynamik eines Sattelzugs - bestehend aus typischer 4x2-Zugmaschine und dreiachsigen Kühlsattelaufleger - mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t ab.

Das Fahrermodell hat die über den Fahrzyklus definierten Fahranweisungen bestehend aus der Zielgeschwindigkeit und den überlagerten Events als Eingang. Zusätzlich gehen die aktuelle Fahrbahnsteigung und die Zuladungs- bzw. Gesamtmasse in das Regelverhalten ein. Sowohl die Zielgeschwindigkeit und Steigung als auch die Events inklusive der Zuladung werden jeweils in Abhängigkeit des aktuell zurückgelegten Wegs aus dem Fahrzyklus heraus vorgegeben. Entsprechend der aktuellen Fahrgeschwindigkeit und den Abweichungen zur Ziel- und Eventgeschwindigkeit berechnet das Fahrermodell positive wie negative Soll-Drehmomente für den Antriebstrang und die Verzögerungseinrichtungen des Fahrzeugs.

Das Fahrzeugmodell ist unterteilt in die zwei zentralen Bestandteile *Antriebstrang* (inklusive Verzögerungseinrichtungen) und *Fahrmechanik*. Innerhalb des Antriebstrangmodells werden aus den Drehmomentvorgaben des Fahrermodells die an den Rädern des Fahrzeugs aktiv wirkenden Drehmomente berechnet. Bezüglich der antreibenden positiven Solldrehmomente sind hierzu der Dieselmotor, das Getriebe und eine vereinfachte Schaltstrategie modelliert. Die negativen Solldrehmomente werden zunächst vom modellierten Schubverhalten des Dieselmotors

und dem Energierückgewinnungssystem am Sattelaufleger aufgebracht. Darüber hinausgehende Drehmomente sind über die Betriebs- und Dauerbremseinrichtungen des Fahrzeugs abzustützen. Die Drehzahlen am Dieselmotor und Getriebe sowie an den Achsgeneratoren ergeben sich aus der Fahrgeschwindigkeit bzw. der achsindividuellen Raddrehzahl, die innerhalb der Fahrmechanik in Abhängigkeit der aktiven Drehmomente am Rad, der Achslastverteilung und der wirkenden Fahrwiderstände berechnet werden.

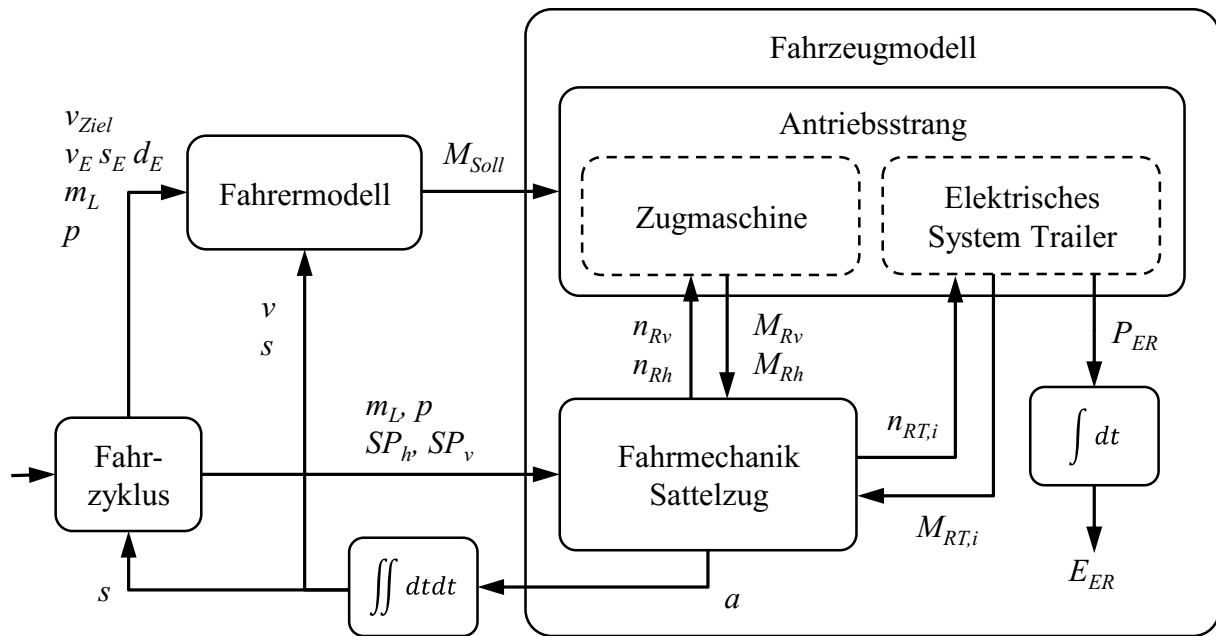


Bild 5.6: Aufbau und Berechnungsablauf Gesamtmodell

Die folgenden Unterkapitel erläutern die Modellierung der Fahrmechanik, des Antriebsstrangs und des elektrischen Systems und gehen auf die Validierung der Modellbestandteile ein. Mit dem Fokus auf der Bremsenergieerückgewinnung ist eine Validierung des Fahrzeugmodells insbesondere hinsichtlich der Fahrmechanik, des Schubverhaltens des Antriebsstrangs und des Energierückgewinnungssystems erforderlich. Für die übrigen Modellbestandteile reicht im Wesentlichen die Überprüfung auf ein grundsätzlich realitätsnahes Verhalten aus. Abschließend folgt die Vorstellung des realisierten Fahrermodells.

5.2.1 Fahrmechanik

Das Modell der Fahrmechanik bildet die Längsdynamik des Sattelzugs nach und basiert auf den Fahrwiderständen und der Zugkraftgleichung nach Kapitel 2.2.1. In das Modell gehen die aktiven Drehmomente an den Rädern des Fahrzeugs ein, die vom Antriebsstrang und den Verzögerungsvorrichtungen generiert werden. Ausgegeben werden die aktuelle Fahrzeugbeschleunigung a und -geschwindigkeit v sowie der zurückgelegte Weg s ab Beginn der Simulation. Zusätzlich werden die Drehzahlen an den Rädern jeder Achse an das Antriebsstrangmodell übergeben. Ein Umstellen der Zugkraftgleichung nach der Fahrzeugbeschleunigung ergibt folgende Gleichung (vgl. Kapitel 2.2.1). Statt der Verwendung des Drehmassenzuschlagsfaktors sind in dieser die rotatorischen Trägheiten separat je Achse angegeben. Durch die ein- bzw. zweifache

Integration der Fahrzeugbeschleunigung über der Zeit berechnen sich die Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg.

$$a = \frac{\left(\frac{M_{Rv}}{r_{Rv}} + \frac{M_{Rh}}{r_{Rh}} + \sum_{i=1}^3 \frac{M_{RT,i}}{r_{RT,i}} \right) - (F_{Rv} + F_{Rh} + \sum_{i=1}^3 F_{RT,i}) - F_L - F_{St}}{m + \frac{\theta_v}{r_v^2} + \frac{\theta_h}{r_h^2} + \sum_{i=1}^3 \frac{\theta_{T,i}}{r_{T,i}^2}} \quad (5.3)$$

$$s = \int v \, dt = \iint a \, dt \, dt \quad (5.4)$$

Bei den Drehmomenten M_R handelt es sich um die aktiven, d.h. antreibenden und verzögernden, Drehmomente an der Vorder- und Hinterachse der Zugmaschine (M_{Rv} und M_{Rh}) sowie den drei Achsen des Sattelauflegers bzw. Trailers $M_{RT,i}$.

Die Berechnung des Luftwiderstands F_L und Steigungswiderstands F_{St} erfolgt nach Kapitel 2.2.1 für das Gesamtfahrzeug. In die achsindividuelle Berechnung der Rollwiderstände F_R gehen jeweils der Rollwiderstandsbeiwert der Reifen und die dynamische Achslast ein. Die Achslasten ergeben sich aus den horizontalen und vertikalen Schwerpunktlagen von Zugmaschine, Sattelaufleger und Zuladung unter Berücksichtigung der Fahrbahnsteigung bzw. Längsneigung des Fahrzeugs und der aktuell an den Schwerpunkten wirkenden Trägheitskräfte. Vernachlässigt werden hingegen die mit der Beschleunigung einhergehende Verschiebung der Schwerpunkte und die Rotation der Fahrzeugbestandteile bzw. deren Aufbauten aufgrund der Federung des Fahrzeugs und der Reifen. Am Sattelaufleger wird aufgrund der gleichmäßigen Druckverteilung in der Luftfederung von gleichen Achslasten an allen drei Achsen ausgegangen. Der Rollwiderstandsbeiwert der Reifen ist gemäß Bild 5.7 in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Achslast modelliert (s. auch [Mit14]) und geht je Achse über ein entsprechendes Kennfeld in die Simulation ein.

Hinsichtlich des Beschleunigungswiderstands gehen neben der translatorischen Trägheit der Gesamtfahrzeugmasse zusätzlich die Trägheitsmomente der rotierenden Komponenten an den einzelnen Achsen ein. An der Vorderachse der Zugmaschine sind dies im Wesentlichen die beiden Räder, deren Trägheitsmoment θ_v vereinfachend als dasjenige eines Vollzylinders mit der Masse und dem Radius des Rads modelliert ist. Gleiches gilt für die Achsen bzw. Räder des Trailers. Sofern an einer der Achsen ein Generator installiert ist, gehen in $\theta_{T,i}$ zusätzlich das Trägheitsmoment des Generators und das Quadrat der Übersetzung zwischen Rad und Generator ein. Zur Bestimmung des Trägheitsmoments an der Hinterachse der Zugmaschine θ_h wird auf den Drehmassenzuschlagsfaktor λ zurückgegriffen, der gangabhängig die auf die angetriebene Hinterachse reduzierten Trägheitsmomente im Antriebstrang abbildet (s. [Mit14] oder [App08]). Als Masse geht die Leermasse der Zugmaschine ein. Dadurch ist eine angenäherte Berechnung des Trägheitsmoments an der Hinterachse möglich.

$$\theta_h = (\lambda - 1) m_z r_{Rh}^2 \quad (5.5)$$

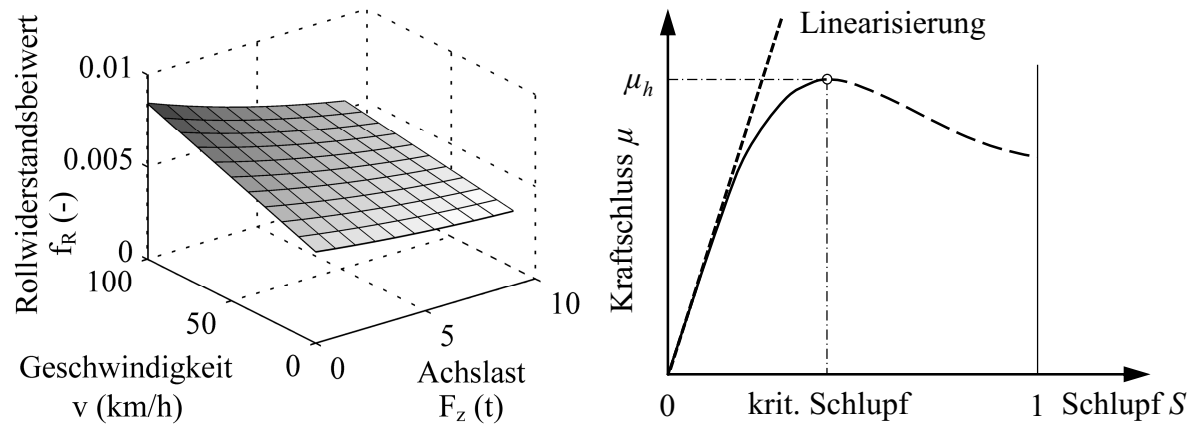


Bild 5.7: Modelliertes Reifenverhalten: Rollwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit der Achslast und Fahrgeschwindigkeit (links) sowie Kraftschluss-Schlupf-Kurve nach [Mit14] inkl. Linearisierung zur Schlupfabstimmung (rechts)

Die Berechnung der Drehzahlen am Dieselmotor und an den Achsgeneratoren erfordert die schlupfbehafteten Raddrehzahlen an den entsprechenden Achsen des Fahrzeugs als Eingang. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis des aktuellen Schlupfs S am Rad. Die aus Gründen der Modellkomplexität und Rechenzeit angewandte vereinfachte Bestimmung des Radschlupfs basiert auf einer typischen Kraftschluss-Schlupf-Kurve für trockene Fahrbahn, wie in Bild 5.7 rechts gezeigt. Unterhalb der Kraftschlussgrenze und des kritischen Schlupfs lässt sich wie gezeigt die Beziehung zwischen Schlupf S und Kraftschlussbeiwert μ durch eine Gerade annähern. Der Kraftschlussbeiwert beschreibt das Verhältnis der Radumfangskraft F_x zur Radaufstandskraft bzw. Radlast F_z . Sowohl F_x als auch F_z sind je Achse bekannt, sodass über die angewandte Linearisierung der zugehörige Radschlupf an der Achse als Funktion von μ bestimmbar ist.

$$F_x = \frac{M_R}{r_R} - \frac{\theta}{r_R^2} a - F_R \quad (5.6)$$

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (5.7)$$

Mittels des Schlupfs S und der theoretischen Drehzahl eines mit der Fahrgeschwindigkeit frei mitrollenden Rads n_{R0} lässt sich die schlupfbehaftete Raddrehzahl je Achse berechnen. Ist der Schlupf im Fall einer positiven Radumfangskraft ebenfalls positiv, handelt es sich um treibenden Schlupf und die tatsächliche Raddrehzahl ist größer als am frei mitrollenden Rad. Bei negativer Radumfangskraft und bremsendem bzw. negativem Schlupf ist hingegen die tatsächliche Raddrehzahl kleiner als am frei mitrollenden Rad.

$$n_R = (1 + S) n_{R0} \quad (5.8)$$

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur energetisch-orientierten Bewertung der Bremsenergie-rückgewinnung lediglich Fahrmanöver ausreichend unterhalb der Kraftschlussgrenze betrachtet werden, ist die getroffene Vereinfachung zulässig. Andernfalls sind komplexere Reifenmodelle, wie bspw. dasjenige nach Pacejka [Pac92] einzusetzen, das auch in [Bau14] oder [Wei14] Anwendung findet.

Zur Validierung und Parametrierung des Fahrmechanik-Modells wurden Ausrollversuche mit Beladungen von 0 t, 10 t und 20 t auf realer Fahrbahn durchgeführt. Die Versuche fanden auf der Startbahn eines stillgelegten Flugplatzes in Dreierwalde und dem Ovalrundkurs des automobilen Testcenters in Papenburg statt. Zur Kompensation von Steigungs- und Windeinflüssen wurden die Ausrollversuche in entgegengesetzter Fahrtrichtung jeweils mehrmals wiederholt und entsprechende Mittelwerte gebildet. Das Fahrzeug wurde auf jeweils ca. 80 km/h beschleunigt und anschließend mit geöffneter Kupplung und ohne Betätigung der Bremse bis zum Stillstand rollen gelassen. In der Rollphase wirken keine aktiven Drehmomente an den Rädern, so dass die sich einstellende Verzögerung nach Gleichung (5.3) ein direktes Maß für die am Fahrzeug wirkenden Fahrwiderstände und Trägheitskräfte ist.

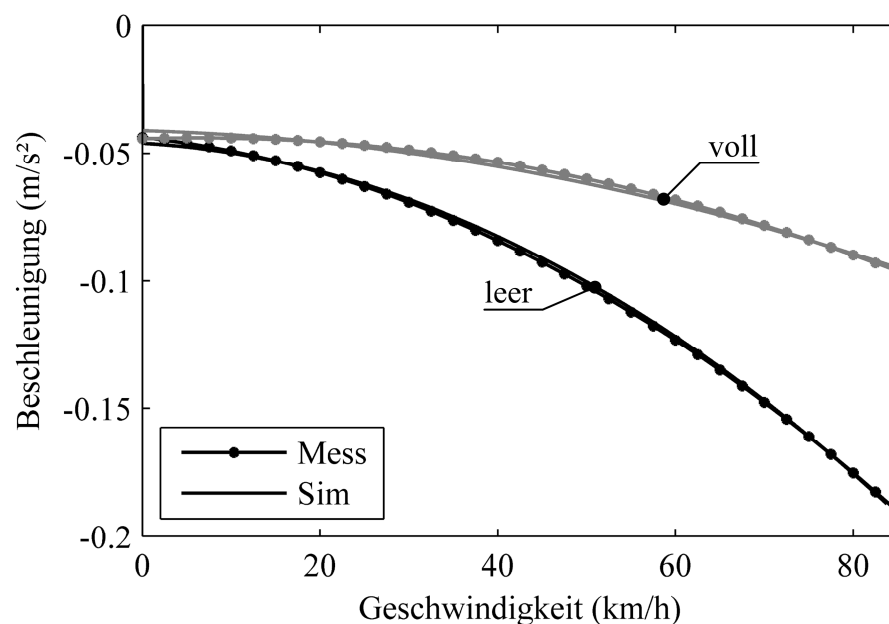


Bild 5.8: Abgleich Messung und Simulation für exemplarischen Ausrollversuch in ausgekuppeltem Zustand mit unterschiedlicher Beladung (leer: 0t - voll: 20t)

Ein Ergebnis der Ausrollversuche und Modellvalidierung für zwei unterschiedliche Beladungszustände zeigt Bild 5.8. Dargestellt sind die gemessene und simulierte Beschleunigung des Fahrzeugs über der aktuellen Fahrgeschwindigkeit. Bei niedriger Fahrgeschwindigkeit verzögert das Fahrzeug im Wesentlichen durch den Rollwiderstand, bei höheren Geschwindigkeiten geht zusätzlich der Luftwiderstand ein. Wie zu erkennen lässt sich das reale Fahrzeugverhalten mit dem Modell der Fahrmechanik über den gesamten Bereich der relevanten Fahrgeschwindigkeiten und möglichen Beladungszustände hinreichend genau abbilden.

5.2.2 Antriebstrang Zugmaschine und Energierückgewinnungssystem

Das Modell des Antriebstrangs der Zugmaschine und des elektrischen Energierückgewinnungssystems am Trailer berechnet die aktiven Drehmomente M_R an den Rädern des Fahrzeugs. Eingaben sind die Drehmomentvorgaben des Fahrermodells und die Drehzahlen an den einzelnen Rädern. Im Fall positiver und damit antreibender Drehmomentvorgaben werden diese durch den Antriebstrang der Zugmaschine als einzige Fahrtriebsquelle aufgebracht. Verzögernde Drehmomentvorgaben können hingegen über den Dieselmotor im Schubbetrieb, die Achsgeneratoren am Trailer und die konventionellen Dauer- und Betriebsbremsen aufgebracht werden.

Der Antriebstrang der Zugmaschine wirkt auf deren Hinterräder und besteht aus Dieselmotor, Kupplung, automatisierten Schaltgetriebe und Achsgetriebe. Im Simulationsmodell ist der Dieselmotor über seine drehzahlhängige Volllast- und Schubkennlinie und ein typisches Verbrauchskennfeld abgebildet. Die Kupplung ist im Modell als schaltendes Element realisiert, das lediglich über die Zustände *Offen* und *Geschlossen* verfügt. Bei geöffneter Kupplung, wie bspw. im Stillstand des Fahrzeugs, wird der Dieselmotor mit Leerlaufdrehzahl und einem festen Verbrauch pro Zeiteinheit simuliert. Damit ist für den Fahrtrieb eine Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs möglich. Das Getriebemodell verfügt über zwölf Gänge mit gangabhängigem Wirkungsgrad und Drehmassenzuschlagsfaktor. Die automatische Gangwahl beruht auf einer vereinfachten Schaltstrategie. Hochschaltungen erfolgen, sofern eine obere Drehzahlgrenze am Dieselmotor überschritten wird oder der spezifische Verbrauch in einem höheren Gang niedriger als im aktuellen ist. Zusätzlich wird überprüft, ob nach der Schaltung ausreichend Drehmoment zur Verfügung steht und die Anschlussdrehzahl nicht zu gering ist. Bei Rückschaltungen in einen kleineren Gang wird analog verfahren, sofern vom Fahrermodell ein positives Soll-drehmoment angefordert wird. Bei Drehmomentvorgaben kleiner oder gleich Null, d.h. im Rollen oder Verzögern, ist das alleinige Kriterium das Unterschreiten einer unteren Drehzahlgrenze.

Zur Nachbildung des aufgebauten Versuchsträgers und der während der Versuchsfahrten angewandten Betriebsweise werden die simulierten Achsgeneratoren mit maximal möglichem Soll-Drehmoment aktiviert, sobald die Drehmomentvorgaben des Fahrermodells kleiner oder gleich Null sind. Gleichzeitig bleibt der Antriebstrang geschlossen, sodass der Dieselmotor in den Schubbetrieb übergeht. Die konventionellen Bremseinrichtungen werden nur genutzt, wenn die Sollvorgaben durch das Energierückgewinnungssystem und den Schubbetrieb des Dieselmotors nicht erreicht werden können. Die in diesem Fall der Bremse zugeordneten Drehmomente werden entsprechend der Achslastverteilung des Fahrzeugs auf die Achsen des Modells aufgeteilt.

Im Simulationsmodell ist hinsichtlich der Bremsenergieerückgewinnung insbesondere eine valide Nachbildung des Schlepp- bzw. Schubverhaltens des Fahrzeugs und Antriebstrangs erforderlich. Dazu wurden Ausrollversuche mit geschlossenem Antriebstrang in unterschiedlichen

Gängen durchgeführt. Zusätzlich zu den Fahrwiderständen wirken in diesem Fall das drehzahlabhängige Schubverhalten des Dieselmotors und das Wirkungsgradbehaftete Getriebe. In jeweiligen Gang wurde bis zur Abregeldrehzahl des Dieselmotors beschleunigt und anschließend bis kurz vor Erreichen der Leerlaufdrehzahl gerollt. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Beladungen und in jeweils entgegengesetzter Fahrtrichtung mehrmals wiederholt. Einen Auszug der Ergebnisse zeigt Bild 5.9 für vier Gänge und einen Beladungszustand. Zusätzlich sind Ausrollkurven gezeigt, die mit dem Simulationsmodell bei gleichen Randbedingungen berechnet wurden. Wie zu erkennen kann mit dem Simulationsmodell auch das Schubverhalten hinreichend genau abgebildet werden.

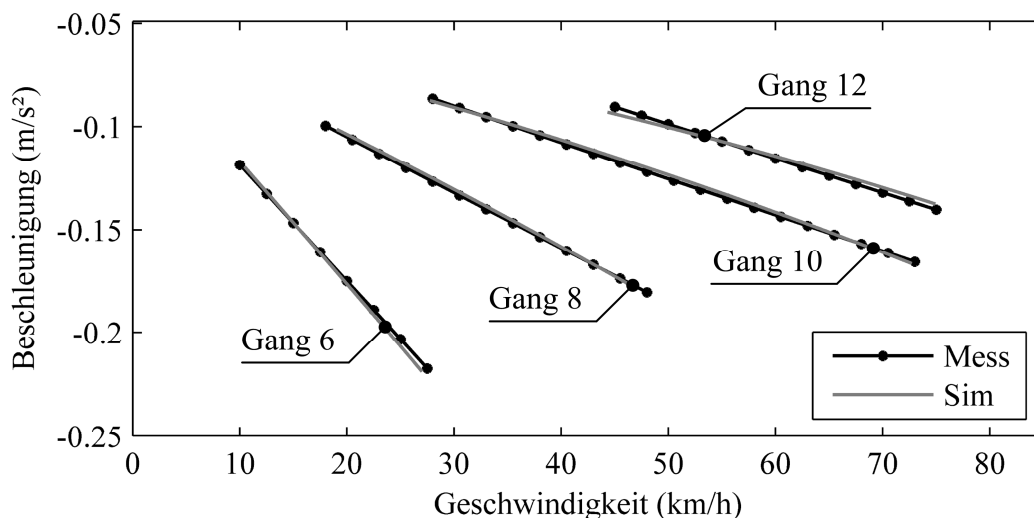


Bild 5.9: Exemplarische Ausrollversuch durchgeführt mit dem aufgebauten Versuchsträger mit eingelegtem Gang und 20 t Beladung sowie Abgleich mit korrespondierenden Simulationsergebnissen

Das elektrische System am Trailer ist bis einschließlich der Einspeisung in den Zwischenkreis modelliert. Das Modell besteht damit aus den beiden Achsgeneratoren inklusive der mechanischen Übersetzungsstufe zu den Rädern und den AC/DC-Umrichtern. Eingaben sind die Drehmomentvorgaben des Fahrermodells bzw. ein daraus abgeleitetes Einschaltsignal und die Radrehzahlen. Ausgegeben werden die elektrische Leistung in den Zwischenkreis P_{ER} und die verzögernden Ist-Drehmomente an den Rädern des Trailers. Das Drehmomentverhalten der Generatoren ist wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben nachgebildet. Nach Aktivierung der Energierückgewinnung wird das Ist-Drehmoment im Simulationsmodell rampenförmig bis zum konstanten Maximalwert erhöht und nach Erreichen einer definierten zurückgewonnenen Energiemenge je Bremsvorgang verringert (vgl. Bild 5.3). Das Wirkungsgradverhalten der Generatoren ist in Abhängigkeit des Drehmoments und der Drehzahl als Kennfeld hinterlegt. Für die Getriebe- und den Umrichter ist jeweils ein fester Wirkungsgrad angenommen. Die Batterie und das Kühlaggregat sind nicht im Modell berücksichtigt. Zur Nachbildung des während der Messfahrten eingestellten Verhaltens wird davon ausgegangen, dass das Kühlaggregat die zurück-

gewonnene Energie vollständig verbraucht und der Ladezustand der Batterie zu jedem Zeitpunkt die Bremsenergieerückgewinnung zulässt (vgl. auch Kapitel 5.1.2). Damit haben sowohl das Kühlaggregat als auch die Batterie keinen Einfluss auf die zurückgewonnene und in den Zwischenkreis eingespeiste elektrische Energie.

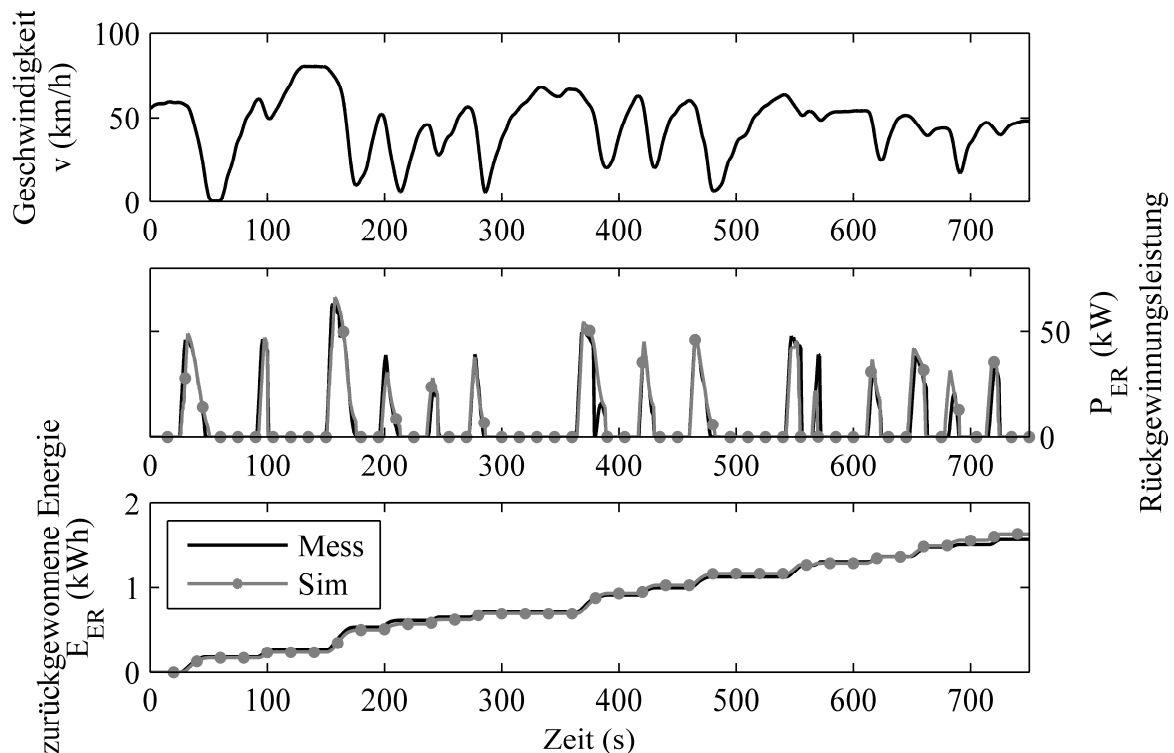


Bild 5.10: Abgleich Messung und Simulation für Modell des Energierückgewinnungssystems auf Basis zeitbasierter Messdaten - Auszug einer Messfahrt „Stadt flach“ mit aufgebautem Versuchsträger und Zuladung von 10t

Bild 5.10 zeigt ein exemplarisches Ergebnis der Modellvalidierung. Die in den Zwischenkreis eingespeiste Leistung und Energie wurden auf Basis gemessener Geschwindigkeits- und Höhenprofile der durchgeführten Messfahrten nachsimuliert. Die Verwendung der zeitbasierten Messdaten als Geschwindigkeitsvorgabe ermöglicht dabei den direkten Abgleich zwischen den Messungen und Simulationsergebnissen. Mit dem Modell lässt sich das Verhalten des elektrischen Systems am Versuchsträger hinreichend genau abbilden, sodass eine weitere Verwendung möglich ist.

5.2.3 Fahrermodell

Das Fahrermodell hat die im wegbasierten Fahrzyklus vorgegebenen Fahranweisungen umzusetzen und die für das Fahrzeugmodell benötigten Sollvorgaben in Form antreibender oder verzögernder Drehmomente zu generieren. Die ebenfalls im Fahrzyklus enthaltene Fahrbahnsteigung und Zuladungsmasse fungieren regelungstechnisch als Störgrößen und sind im Modellverhalten zu berücksichtigen. Die Umsetzung der Fahraufgabe umfasst folgende Punkte:

- Einregeln der Zielgeschwindigkeit
- Verzögern vor Events: ausgehend von der aktuellen Ist-Geschwindigkeit muss an der Position des Events die Event-Geschwindigkeit erreicht sein
- Einregeln der Eventgeschwindigkeit für die Dauer des Events

Zur Erfüllung der Aufgaben wurde eine regelbasierte Fahrstrategie entwickelt. Die Strategie basiert auf einer begrenzten Anzahl an Betriebsmodi und berücksichtigt die aktuelle Zuladungsmasse und Fahrbahnsteigung. Bild 5.11 verdeutlicht die Fahrstrategie. Im Standardfall (1) wird durch das Fahrermodell die wegbasiert vorgegebene Zielgeschwindigkeit v_{Ziel} eingeregelt. Das Fahrermodell agiert währenddessen mit einer geschwindigkeits-, steigungs- und zuladungsabhängigen Vorausschau s_{vor} . Sobald der Abstand zur nächsten Eventposition s_E unter diese Vorausschau fällt, beginnt das Fahrermodell zu verzögern. Im ersten Schritt wird eine gewisse Distanz mit Soll-Drehmoment Null gerollt (2), bevor ein negatives Soll-Drehmoment ausgegeben wird (3). Mit Erreichen der Eventposition regelt das Fahrermodell die Eventgeschwindigkeit v_E ein und hält diese für die Dauer des Events (4). Im Anschluss wird wieder zum Betriebsmodus (1) gewechselt und auf die Zielgeschwindigkeit beschleunigt. Somit existieren vier Betriebsmodi, die im Fahrermodell in sequentieller Reihenfolge durchlaufen werden.

Von diesem Vorgehen wird abgewichen, wenn in der Annäherungsphase oder beim Abfahren eines Events die in der Simulation berechnete Vorausschau zum nächsten Event bereits erreicht wird. In diesem Fall erfolgen ein Abbruch des aktuellen Events und ein direkter Wechsel in den Betriebsmodus (2) zur Annäherung an das folgende Event. Eine Ausnahme hiervon liegt wiederum bei einer Geschwindigkeit des aktuellen Events von Null vor. In diesem Fall wird im Betriebsmodus (4) kein Weg zurückgelegt und das folgende Event kann unabhängig vom vorherigen an- und abgefahren werden.

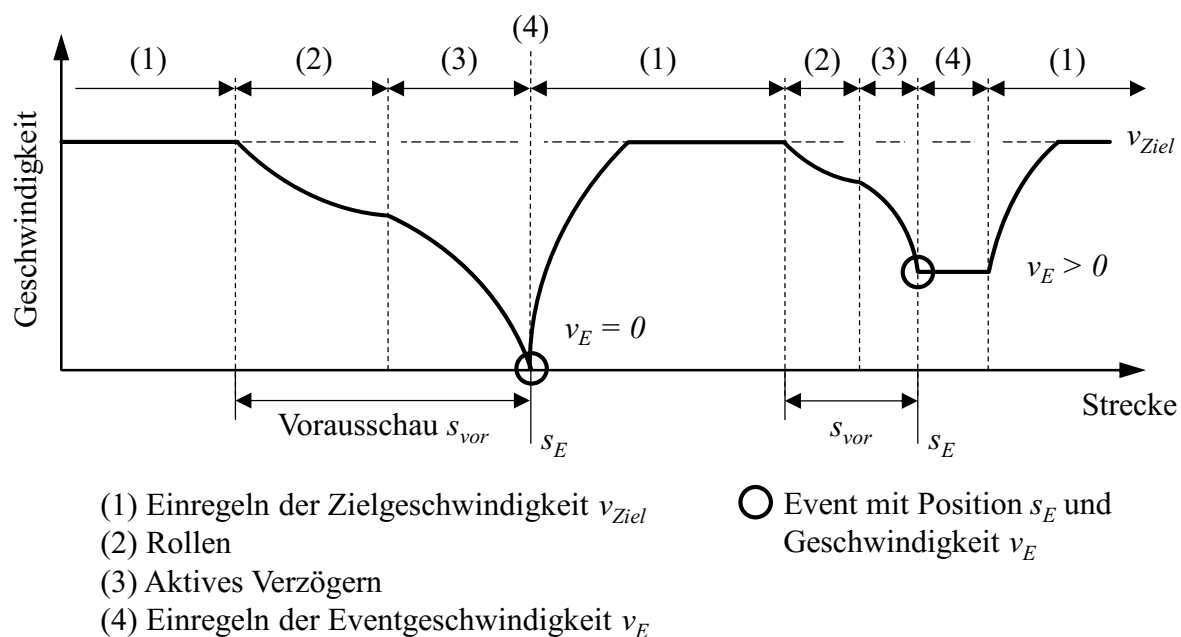


Bild 5.11: Fahrstrategie und Betriebsmodi des Fahrermodells

In den Betriebsmodi (1) und (4) regelt das Fahrermodell jeweils eine konstante Soll-Geschwindigkeit ein. Als Geschwindigkeitsregler kommt ein PI-Regler mit zuladungsabhängigen Verstärkungsfaktoren zum Einsatz. Im Betriebsmodus (2) gibt das Fahrermodell während des Rollens ein Soll-Drehmoment von Null aus. Dabei können zwei Sonderfälle eintreten. Zum einen kann die Ist-Geschwindigkeit an Steigungen unter die Geschwindigkeit des kommenden Events fallen. In diesem Fall wird die Geschwindigkeit des Events direkt eingeregelt. Zum anderen kann die Ist-Geschwindigkeit in Gefällen über die wegbasiert vorgegebene Zielgeschwindigkeit steigen. Dies führt zum Einregeln der Zielgeschwindigkeit und damit zur Vermeidung eines unzulässigen Beschleunigens.

Während der Bremsphase (3) wird durch den Geschwindigkeitsregler ein dynamisch berechneter und wegbasiert vorgegebener Geschwindigkeitsverlauf eingeregelt. Den Verlauf ermittelt das Fahrermodell in Abhängigkeit des aktuellen Fahrzustands und der Eventdaten bei jedem Wechsel von Betriebsmodus (2) zu (3) und damit zu Beginn jedes Bremsvorgangs. Ziel der Geschwindigkeitsvorgabe ist das Erreichen der Event-Position und Event-Geschwindigkeit ausgehend von der aktuellen Ist-Position und Ist-Geschwindigkeit. Zwecks einfacher Berechnung ist im Fahrermodell ein normierter Geschwindigkeitsverlauf für die Bremsphase hinterlegt, der jeweils anhand der aktuellen Situation skaliert wird.

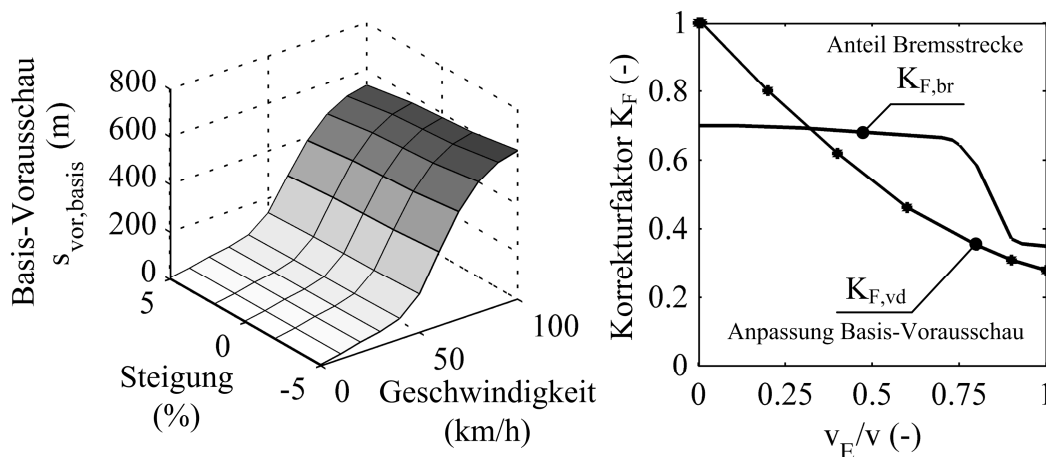


Bild 5.12: Fahrermodell: Basis-Vorausschau auf Events in Abhängigkeit von Steigung und Ist-Geschwindigkeit (links) sowie Korrekturfaktoren (rechts) in Abhängigkeit der aktuellen Event- zur Ist-Geschwindigkeit v_E/v zwecks geschwindigkeitsabhängiger Anpassung der Basis-Vorausschau ($K_{F,vd}$) sowie zur Berechnung des Anteils der Bremsstrecke an der Gesamtvorausschau ($K_{F,br}$)

Zur Parametrierung des Fahrermodells sind die geschwindigkeits-, steigungs- und masseabhängige Vorausschau s_{vor} sowie der Anteil der Brems- bzw. Rollstrecke an der gesamten Vorausschau festzulegen (vgl. Betriebsmodi (2) und (3) nach Bild 5.11). Hierzu zeigt Bild 5.12 links die für mittlere Zuladung definierte Basis-Vorausschau $s_{vor,basis}$ in Abhängigkeit der Fahrbahnsteigung und Ist-Geschwindigkeit, die in der laufenden Simulation an die aktuelle Fahr-situation angepasst und in die letztendliche Vorausschau s_{vor} umgerechnet wird. Im ersten Schritt

erfolgt eine Anpassung an die aktuell über den Fahrzyklus vorgegebene Zuladungsmasse m_L nach Formel (5.9). Dies führt zu einer Verringerung der Basis-Vorausschau für Zuladungen unterhalb der mittleren Zuladung und dementsprechend zu einer Vergrößerung für höhere Zuladungen.

$$s_{vor} = s_{vor,basis} \left[1 + 0,07 \left(\frac{2 m_L}{m_{L,max}} - 1 \right) \right] \quad (5.9)$$

Als nächstes ist die auf diese Weise masseabhängig korrigierte Vorausschau an das Geschwindigkeitsverhältnis der aktuellen Event- und Ist-Geschwindigkeit anzupassen. Hierzu wird die Vorausschau in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverhältnisses v_E/v mit dem Korrekturfaktor $K_{F,vd}$ nach Bild 5.12 rechts multipliziert. Für Geschwindigkeitsverhältnisse nahe Null, d.h. insbesondere für kleine Event-Geschwindigkeiten v_E und große Ist-Geschwindigkeiten v , wird die masseabhängig korrigierte Vorausschau unverändert übernommen ($K_{F,vd} \approx 1$). Für Geschwindigkeitsverhältnisse nahe Eins und damit annähernd übereinstimmende Event- und Ist-Geschwindigkeiten ist demgegenüber eine kleinere Vorausschau ausreichend ($K_{F,vd} < 1$).

Abschließend wird der Anteil der Bremsstrecke an der zuvor bestimmten Vorausschau berechnet (entspricht der Fahrstrecke im Betriebsmodus (3) des Fahrermodells, vgl. Bild 5.11). Zur Berechnung wird die Vorausschau mit einem weiteren Faktor $K_{F,br}$ ebenfalls in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverhältnisses v_E/v multipliziert. Das prinzipielle Verhalten entspricht dabei den vorherigen Ausführungen.

5.3 Validierung der Fahrzyklen und Methode

Nach erfolgter Validierung des Modellverhaltens steht die Überprüfung der entwickelten Methode hinsichtlich ihrer Eignung zur einsatzindividuellen Bewertung der Bremsenergierückgewinnung am Kühlsattelaufleger aus. Dies betrifft insbesondere die auf Grundlage der Einsatzprofilbeschreibung erzeugten weg- und eventbasierten synthetischen Fahrzyklen in Kombination mit dem Gesamtfahrzeug- und Fahrermodell. Mit der Methode müssen sich die zurückgewinnbaren Bremsenergiemengen für beliebige Streckenzusammensetzungen, topographische Gegebenheiten und Beladungszustände hinreichend genau bestimmen lassen.

Zur Bewertung der Eignung werden die im Projekt E³-Trail zu Versuchszwecken genutzten Rundstrecken und die zugehörigen Messergebnisse hinsichtlich der Bremsenergierückgewinnung herangezogen (vgl. Tabelle 5.1). Die einzelnen Rundstrecken wurden zunächst entsprechend der genutzten Streckenarten und Topographieklassen sowie unter Annahme einer normalen Verkehrsdichte als Einsatzprofil nachgebildet (vgl. Bild 5.13 links). Mit diesen Einsatzprofilen und der gesamten zur Verfügung stehenden Datenbasis als Eingang wurden gemäß vorgestellter Methode die benötigten Fahrzyklen erzeugt (Bild 5.13 rechts) und anschließend in Kombination mit dem bereits validierten Fahrzeug- und Fahrermodell zur Simulation des Fahrzeugbetriebs verwendet.

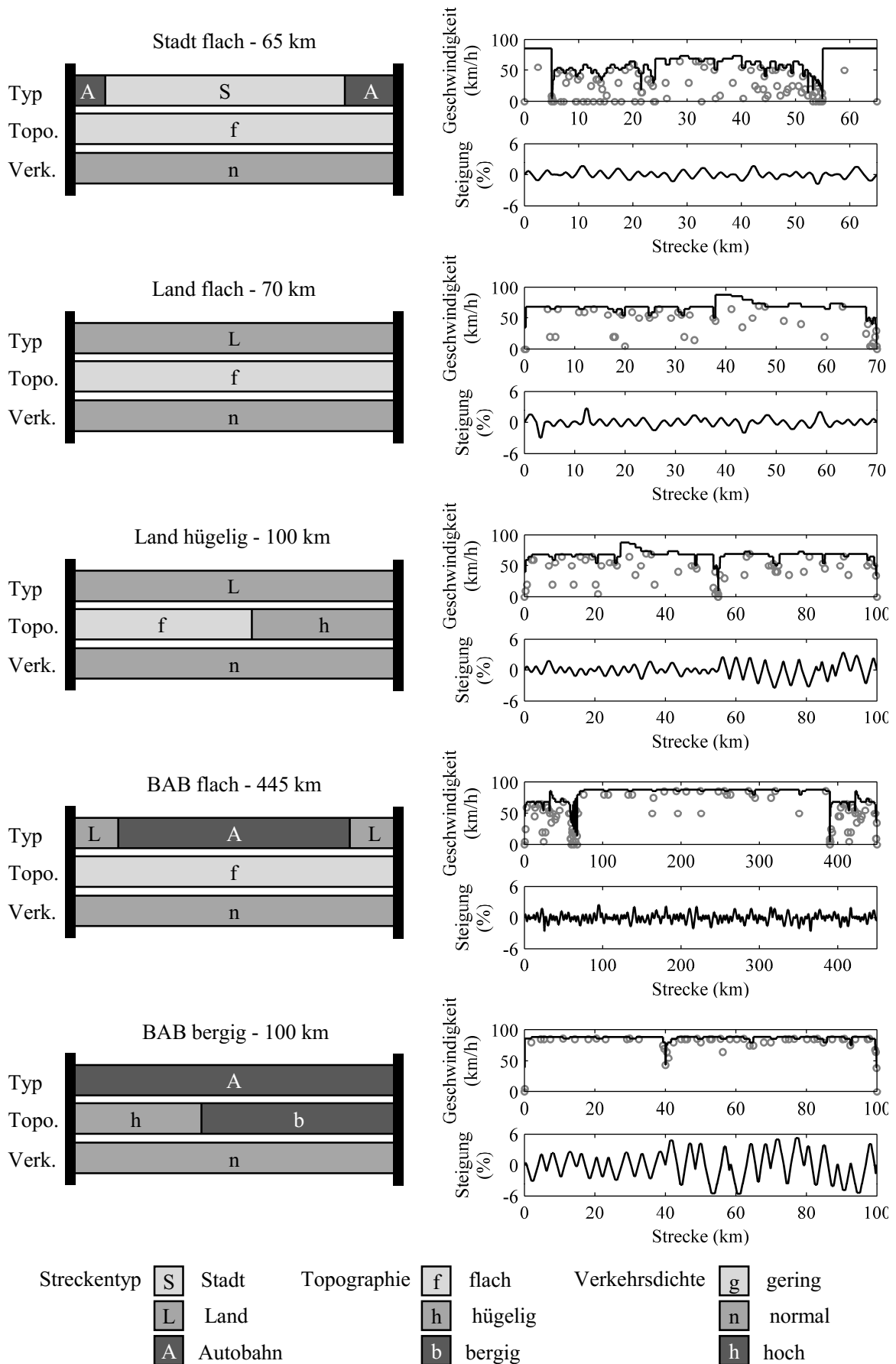


Bild 5.13: Nachbildung Testrunden als Einsatzprofil (links) und auf Basis der Einsatzprofile erzeugte Fahrzyklen (rechts)

Die Datenbasis zur Erzeugung der Fahrzyklen basiert auf den Messdaten des Projekts E³-Trail und damit auch auf den zur Validierung herangezogenen Rundstrecken. Da letztere jedoch nur einen kleinen Teil der insgesamt mit dem Versuchsträger durchgeführten Fahrten ausmachen, ist ein übermäßiger Einfluss ihrer spezifischen Geschwindigkeits- und Höhenprofile auf die Datenbasis und Fahrzyklen auszuschließen.

Damit sind die gemessenen und simulierten zurückgewonnenen Energiemengen für die Rundstrecken direkt vergleichbar. Eine gleichzeitige Übereinstimmung der Mess- und Simulationsergebnisse für alle Rundstrecken mit ihren spezifischen Zusammensetzungen und Beladungszustände lässt darauf schließen, dass die Methode und die erzeugten Fahrzyklen sowohl zur Nachbildung beliebiger Streckenzusammensetzungen und damit individueller Fahrzeugeinsätze als auch zur Bewertung der Bremsenergieerückgewinnung geeignet sind.

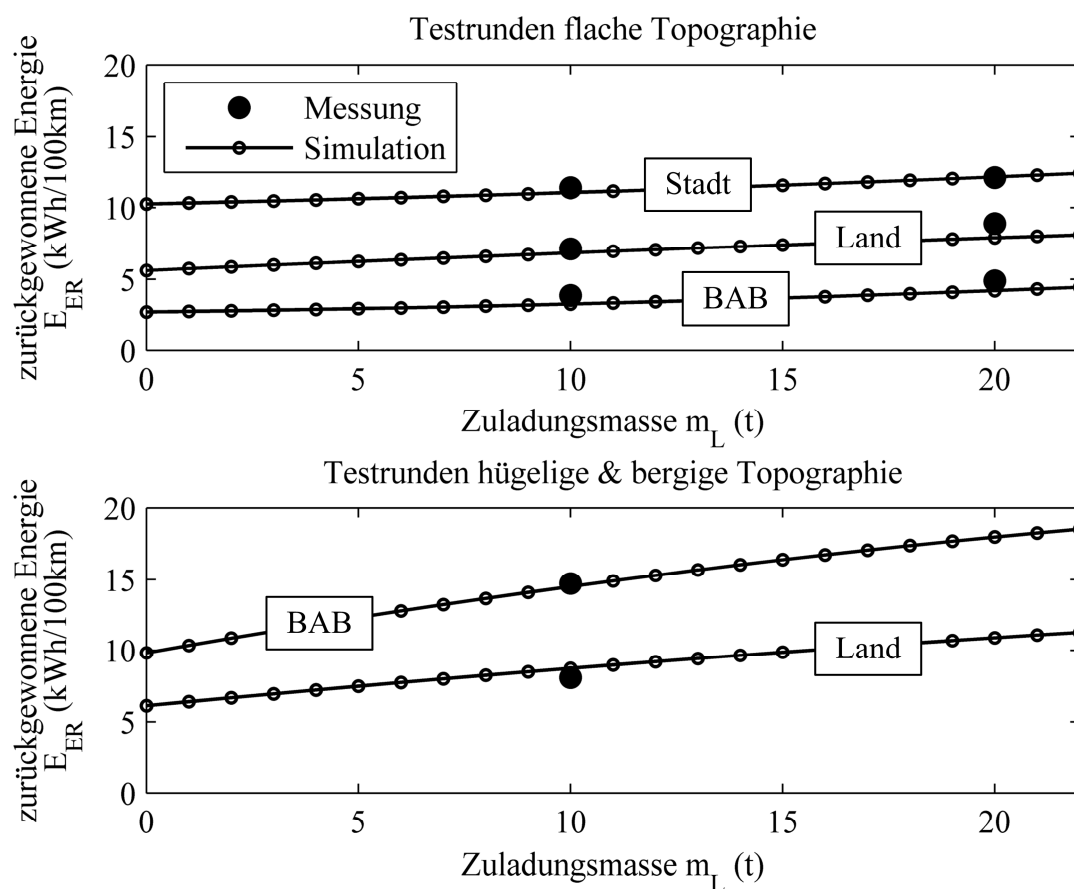


Bild 5.14: Validierung Methode durch Abgleich der zurückgewonnenen Energiemengen für Testrunden in Messfahrten und Simulation

Das Ergebnis des Abgleichs zeigt Bild 5.14. Dargestellt sind zum einen die Messergebnisse des Projekts E³-Trail als einzelne Messpunkte (vgl. auch Bild 5.4) und zum anderen die auf Basis der erzeugten Fahrzyklen mit unterschiedlichen Zuladungen simulierten Ergebnisse. Die Tendenzen zwischen den Beladungszuständen und Rundstrecken mit ihrer spezifischen Streckenzusammensetzung und Topographie werden trotz kleinerer Abweichungen korrekt wiedergegeben.

Mittels der entwickelten Methode und den entsprechend erzeugten Fahrzyklen lassen sich somit die zurückgewinnbaren Bremsenergiemengen für die zu Versuchszwecke genutzten Rundstrecken und den Systemaufbau des Versuchsträgers hinreichend genau simulieren. Die Rundstrecken decken darüber hinaus in Summe alle wesentlichen Streckenarten, topographische Gegebenheiten und Beladungszustände ab und es ist daher davon auszugehen, dass auch für individuelle Fahrzeugeinsätze, d.h. anderweitige Streckenzusammensetzungen und Fahrzeugparametrierungen, die zurückgewinnbaren Bremsenergiemengen berechnet werden können.

Damit ist abschließend die Eignung der entwickelten Methode zur einsatzindividuellen Bewertung der Bremsenergierückgewinnung am Kühlsattelaufleger nachgewiesen. Mit diesem Ergebnis wird die Methode im Folgenden für weitergehende Analysen zur Dimensionierung des Energierückgewinnungssystems angewandt.

5.4 Weitergehende Analysen

Alle bisher vorgestellten Ergebnisse zur Bremsenergierückgewinnung sind nur für den aufgebauten Versuchsträger und die gewählten Testrunden gültig und wurden lediglich zur Validierung des Simulationsmodells und der Fahrzyklen herangezogen. Dieses Kapitel widmet sich deshalb der Bestimmung der Energiebilanz für realitätsnahe Einsatzprofile und alternative Systemkonfigurationen aus installierter Generatorleistung und mittlerem Energiebedarf des Kühlaggregats. Aufbauend auf den Ergebnissen werden in Abhängigkeit des Fahrzeugeinsatzes die Generatorleistung und erforderliche Speicherkapazität der Batterie für einen rein elektrischen Betrieb des Kühlaggregats festgelegt. Dazu finden die entwickelte Methode und die nach dieser erzeugten Fahrzyklen Anwendung.

5.4.1 Zielstellung und Eingangsdaten

Ziel dieser weitergehenden Analysen ist die Grobdimensionierung des Energierückgewinnungssystems bestehend aus Generator und Energiespeicher für exemplarische realitätsnahe Einsatzprofile und unterschiedliche mittlere elektrische Leistungsanforderungen des Kühlaggregats. Durch systematische Parametervariation der Generatorleistung und der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme ist diejenige Kombination der beiden Parameter zu ermitteln, für die sich eine ausgeglichene Energiebilanz zwischen Fahrtbeginn und -ende einstellt. Angestrebtes Ergebnis ist die einsatzindividuelle Dimensionierung des Systems bzw. die Vermeidung einer Über- oder Unterdimensionierung mit entsprechend positiver bzw. negativer Energiebilanz zum Fahrtende. Aus dem zeitlichen Verlauf der Energiebilanz am Speicher ist in einem weiteren Schritt die mindestens erforderliche Speicherkapazität abzuleiten. Im Sinne einer einsatzindividuellen Betrachtung ist damit die Energiebilanz das zentrale Kriterium zur vergleichenden Bewertung unterschiedlicher Systemkonfigurationen.

Die mechanische Generatorleistung $P_{Gen, mech}$ wurde zwischen 0 kW und 200 kW variiert, was in etwa dem doppelten der am Versuchsträger installierten Generatorleistung entspricht. Seitens

des Kühlaggregats erfolgte die Variation zwischen 0 kW und 10 kW mittlerer elektrischer Leistungsaufnahme P_{KA} . Die Analysen bezogen sowohl den Dauer- als auch den Intervallbetrieb ein, wobei in beiden Fällen von gleicher mittlerer Leistungsaufnahme ausgegangen wurde. Für den Intervallbetrieb wurde in Anlehnung an Bild 5.5 eine Intervalldauer von 50 Minuten und ein Verhältnis der tatsächlichen Betriebs- zur Intervalldauer von 50% angenommen. Damit ist die Leistungsaufnahme in den tatsächlichen Betriebsphasen doppelt so hoch wie im Dauerbetrieb.

Als Eingangsdaten hinsichtlich des Fahrzeugeinsatzes dienten die realitätsnahen Einsatzprofile für den Verteiler- und Fernverkehr nach Bild 3.3 und die mit diesen erzeugten Fahrzyklen nach Bild 4.20 und Bild 4.21. Seitens des Fahrzeugs erfolgten die Betrachtungen für einen typischen Sattelzug mit 40 t zulässigem Gesamtgewicht bestehend aus zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsigem Kühlsattelaufleger. Das hinterlegte Fahrzeug- und Fahrermodell entspricht den Ausführungen nach Kapitel 5.2. Auch der modellierte grundsätzliche Aufbau des elektrischen Systems stimmt mit demjenigen des Versuchsträgers überein, lediglich für die Komponenten und Betriebsweise des Energierückgewinnungssystems wurden abweichende Annahmen getroffen. Vom Fahrermodell wird wie zuvor ein Soll-Bremsmoment auf Radniveau vorgegeben, das zunächst über den Schubetrieb des Dieselmotors abgedeckt wird. Darüber hinausgehende Bremsmomente werden soweit möglich vom Energierückgewinnungssystem aufgebracht, bevor die weiteren Bremsenrichtungen des Fahrzeugs genutzt werden. Im Gegensatz zum Versuchsträger nach Kapitel 5.1.1 und dessen Simulationsmodell erfolgt eine Anpassung des Generator Drehmoments an die Fahrervorgaben und kein digitales Ein- bzw. Ausschalten der Generatoren.

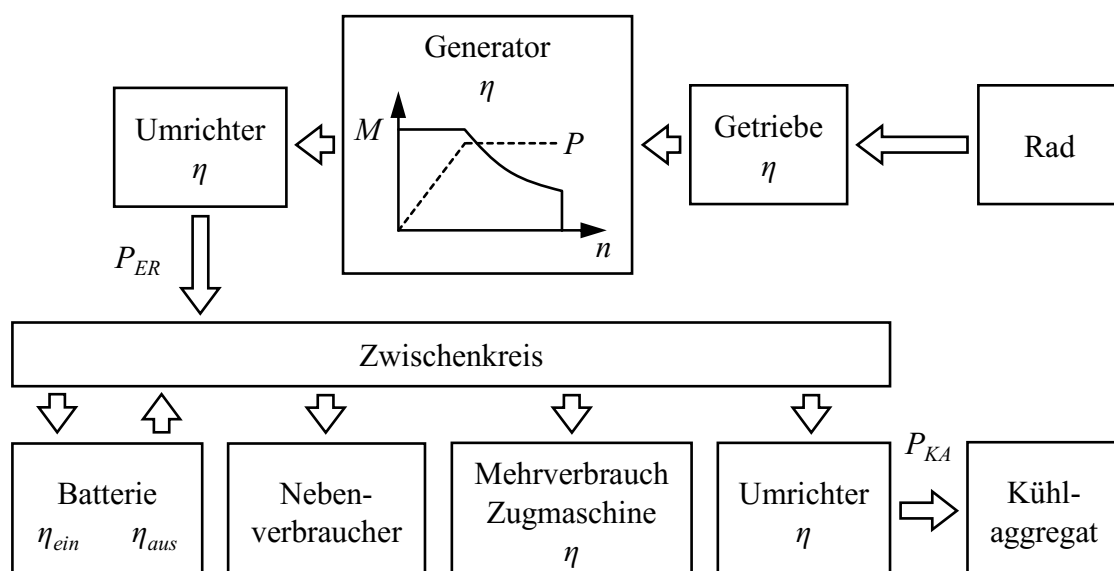


Bild 5.15: Systemstruktur und Energiewandlungskette für weitergehende Analysen inklusive Generatorverhalten und Wirkungsgraden

Zwischen Rad und Generator wurde wie in Bild 5.15 dargestellt eine wirkungsgradbehaftete Getriebestufe angenommen. Die Modellierung des Generators erfolgte über eine typische Drehmomentkennlinie in Abhängigkeit der Drehzahl und einen Wirkungsgrad. Im Gegensatz zum Versuchsträger steht die maximale Rückgewinnungsleistung damit über einen weiteren Drehzahlbereich zur Verfügung. Die Generatorkennlinie ist im Simulationsmodell normiert hinterlegt und lässt sich auf die aktuell betrachtete Generatorleistung skalieren. Zudem wurden die Rampen bis zum Erreichen des Maximaldrehmoments steiler angenommen, sodass das maximale Drehmoment innerhalb einer Sekunde erreicht wird. Die vom Generator gelieferte elektrische Leistung fließt über einen wirkungsgradbehafteten Umrichter als Rückgewinnungsleistung P_{ER} in den Zwischenkreis. Aus diesem entnimmt das Kühlaggregat über einen weiteren wirkungsgradbehafteten Umrichter die Leistung P_{KA} . Zusätzlich wurden energieverbrauchende Nebenverbraucher angenommen, wie bspw. Steuergeräte oder die Flüssigkeitskühlung des elektrischen Systems, die aus dem Zwischenkreis zu versorgen sind. Diese sind über eine Grundlast und eine einschaltabhängige Zusatzlast in Abhängigkeit der installierten Generatorleistung von in Summe maximal 200 W modelliert.

Im Gegensatz zum konventionellen Kühlsattelzug erhöhen sich durch die elektrischen Komponenten und die erforderlichen konstruktiven Anpassungen das Leergewicht des Trailers und der Energie- und Kraftstoffverbrauch der Zugmaschine. Wie stark diese Erhöhung ausfällt, bestimmt neben der Zusatzmasse im Wesentlichen das Einsatzprofil. Durch Vorgabe einer Zusatzmasse als Funktion der installierten Generatorleistung wurde der Mehrverbrauch an Traktionsenergie am Rad der Zugmaschine in den Simulationen bestimmt (vgl. Kapitel 2.2.1). Das Zusatzgewicht berücksichtigt alle Änderungen gegenüber dem konventionellen Fahrzeug und wurde zu maximal 700 kg bei 200 kW Generatorleistung angenommen. Der errechnete Mehrverbrauch geht negativ mit einem Wirkungsgrad bzw. Sicherheitsfaktor in die Energiebilanz ein. Auf diese Weise wird mit dem Ziel einer Grobdimensionierung des Systems angenähert berücksichtigt, dass im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug der Mehrverbrauch der Zugmaschine durch einen erweiterten elektrischen Betrieb des Kühlaggregats zu kompensieren ist.

Aus der Summe der eingespeisten und entnommenen Energiemengen ergibt sich die Energiebilanz am Energiespeicher bzw. der Batterie. Für diese wurde sowohl für die Ein- als auch die Ausspeicherung ein eigenständiger Wirkungsgrad angenommen. Alle Wirkungsgrade in den durchgeführten überschlägigen Analysen sind betriebspunkt- und damit im Wesentlichen auch technologie- und bauartunabhängig. Die Wirkungsgrade wurden so gewählt, dass sich ohne Berücksichtigung des Mehrverbrauchs der Zugmaschine und der untergeordneten Nebenverbraucher für die gesamte Energiewandlungskette vom Rad, über den Generator und die Batterie bis zum Anschluss des Kühlaggregats ein Wirkungsgrad von 68,7 % ergibt.

5.4.2 Ergebnisse für realitätsnahe Einsatzprofile

Durch systematische Variation der Generatorleistung und der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlaggregats wurden unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen zum

Systemverhalten für die beiden Einsatzprofile des Verteiler- und Fernverkehrs nach Bild 3.3 die entsprechenden Parameterkombinationen mit ausgeglichener Energiebilanz zwischen Fahrtbeginn- und ende ermittelt.

Tabelle 5.2: Kenndaten der Einsatzprofile, Dauer für konventionelles Basisfahrzeug³

	Länge (km)	Gesamtdauer (h)	Standzeit (h)
Verteilerverkehr	130	7:23	4:25
Fernverkehr	550	8:25	1:05

Beide Einsatzprofile weisen trotz unterschiedlicher Streckenlänge eine ähnliche zeitliche Dauer auf, die neben der überwiegenden Streckenart insbesondere auf die deutlich höhere Standzeit im Verteilerverkehr zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 5.2). Der zeitlichen Dauer steht bei gleicher mittlerer elektrischer Leistungsaufnahme des Kühlaggregats ein proportionaler Energieverbrauch im gesamten Einsatzprofil gegenüber. Ein rein elektrischer Betrieb des Kühlaggregats erfordert somit für den Verteilerverkehr eine deutlich höhere Energierückgewinnungsrate pro Fahrstrecke als im Fernverkehr.

Ein exemplarisches Ergebnis für eine ausgeglichene Energiebilanz im Einsatzprofil Fernverkehr zeigt Bild 5.16 für 100 kW Generatorleistung und eine mittlere elektrische Leistungsaufnahme des Kühlaggregats von 5,5 kW. Im oberen Graph ist die zurückgewonnene mechanische Energie auf Radniveau über der Fahrtdauer dargestellt und im mittleren der Energieverbrauch des Kühlaggregats im Dauerlauf und Intervallbetrieb, der zum Fahrtende in beiden Fällen identisch ist. Aus beiden Verläufen und unter Einbeziehung der Nebenverbraucher und des Mehrverbrauchs der Zugmaschine ergibt sich die wirkungsgradbehaftete Energiebilanz an der Batterie, wie im unteren Teil der Abbildung ersichtlich.

Das Ergebnis der Parametervariation ist für das jeweilige Einsatzprofil der Zusammenhang zwischen der minimal benötigten Generatorleistung zur Bedienung einer geforderten mittleren elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlaggregats. Ein Auftragen der benötigten Generatorleistung über der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlaggregats ergibt für die beiden Einsatzprofile die in Bild 5.17 oben gezeigten Verläufe. Im Einsatzprofil Fernverkehr ist mit der maximalen Generatorleistung von 200 kW die Versorgung eines Kühlaggregats mit ca. 8,2 kW mittlerer elektrischer Leistungsaufnahme mit ausgeglichener Energiebilanz möglich. Dagegen ist im Verteilerverkehr für den angenommenen Variationsbereich lediglich eine Bereitstellung von maximal 4,3 kW möglich. Dies ist trotz der pro Strecke höheren Energierückgewinnungsrate auf den deutlich höheren Standanteil zurückzuführen.

³ Die Gesamtdauer wurde in Simulationen mit den angenommenen Fahrer- und Fahrzeugparametern bestimmt und kann für abweichende Parametrierungen variieren.

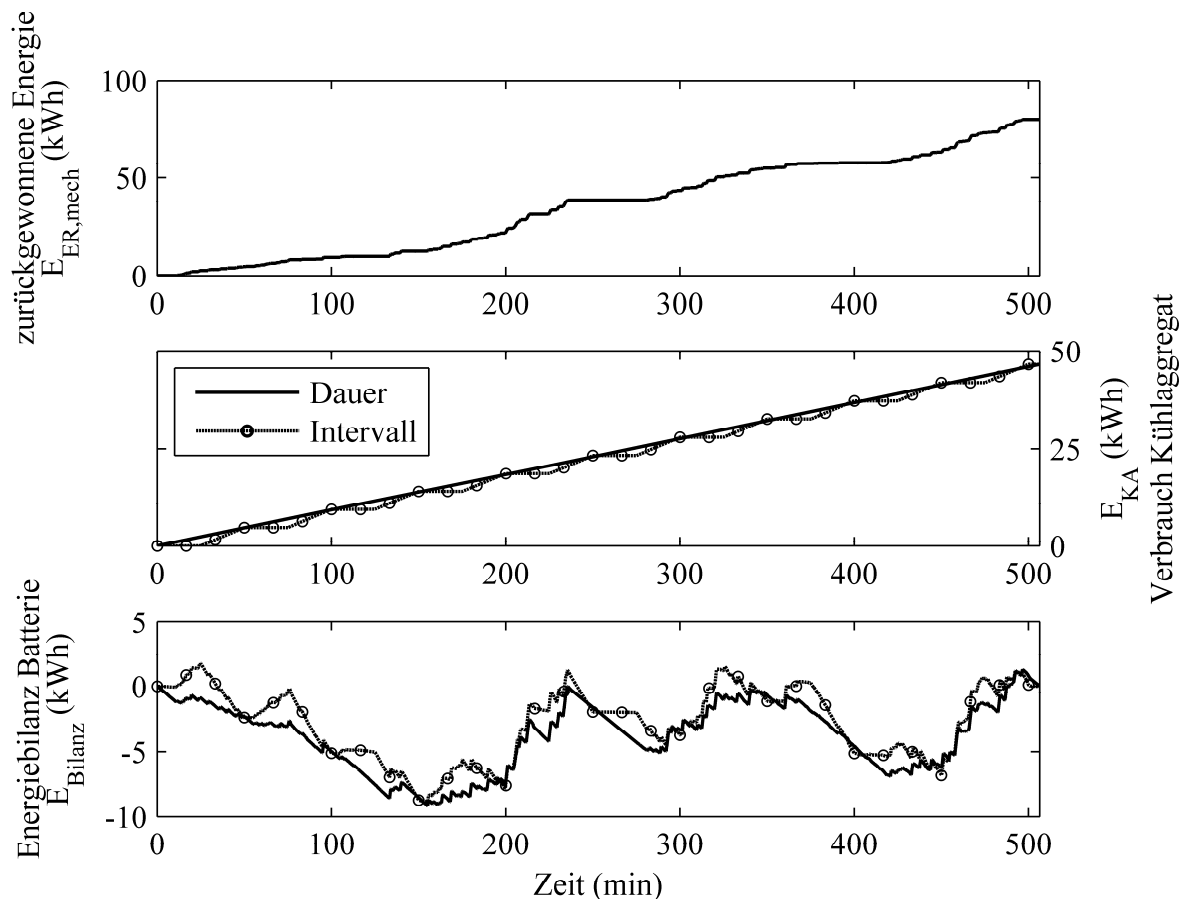


Bild 5.16: Zeitliche Verläufe für Energierückgewinnung, -verbrauch und -bilanz im Einsatzprofil Fernverkehr mit 100 kW Generatorleistung und 5,5 kW mittlerer elektrischer Leistungsaufnahme des Kühlaggregats

Für jede gewählte Kombination aus Kühlaggregat und Generatorleistung lässt sich aus dem zeitlichen Verlauf der Energiebilanz am Speicher die Differenz zwischen dem globalen Maximum und Minimum des Bilanzverlaufs und damit die mindestens erforderliche nutzbare Speicherkapazität ableiten. Für Batterien, wie typischerweise in Traktionsantrieben von Elektro- oder Hybridfahrzeugen eingesetzt, ist nur ein gewisser Teil der Gesamtkapazität dauerhaft nutzbar. Eine real eingesetzte Batterie muss dementsprechend größer als die bestimmte nutzbare Kapazität sein.

Die in Bild 5.17 unten dargestellten Kurven für den Dauer- und Intervallbetrieb zeigen den Zusammenhang zwischen der ermittelten mindestens erforderlichen Speicherkapazität der Batterie und der Generatorleistung, die wiederum eindeutig einer Leistung des Kühlaggregats zugeordnet ist. Insbesondere bei höheren Leistungen erfordert der Intervallbetrieb größere Speicherkapazitäten, was auf die höhere Leistungsaufnahme während der tatsächlichen Betriebsphasen des Kühlaggregats und den daraus resultierenden ungleichmäßigeren Bilanzverlauf zurückzuführen ist.

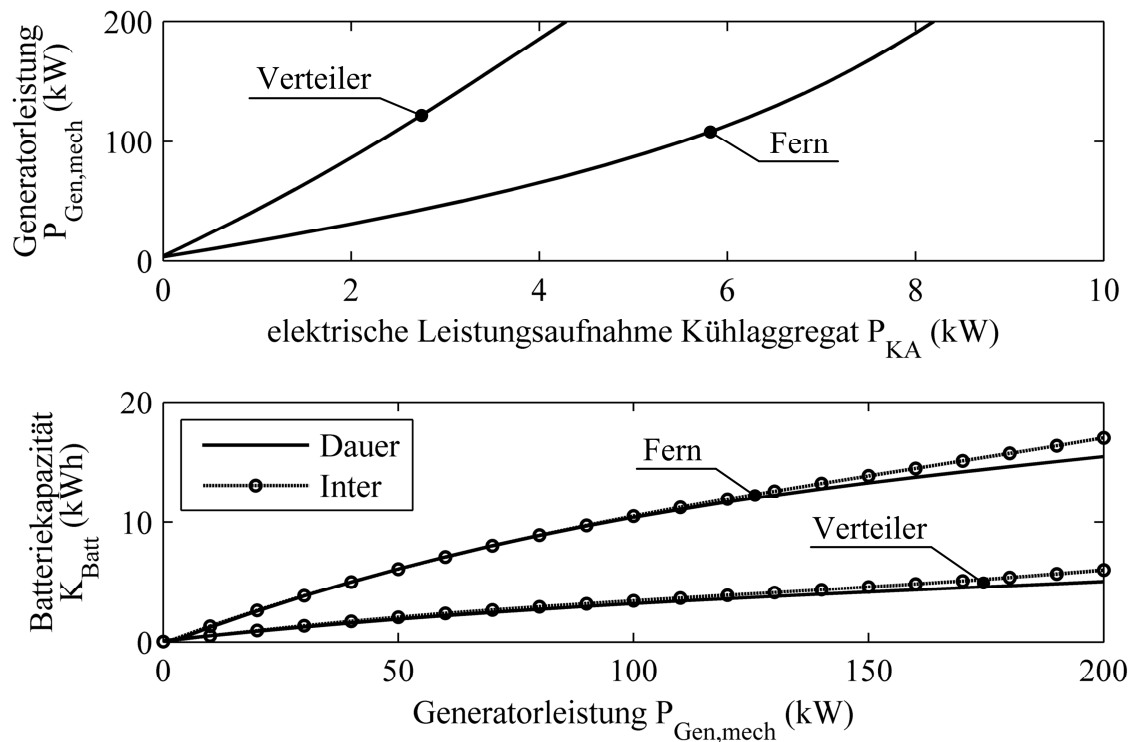


Bild 5.17: Mindestens erforderliche Generatorleistung zur Versorgung eines Kühlaggregats mit gegebener mittleren elektrischen Leistungsaufnahme (oben) und zugeordnete Speicherkapazität der Batterie im Dauer- und Intervallbetrieb (unten) für die Einsatzprofile nach Bild 3.3 und angenommene Fahrzeug- und Systemparameter

Im Gegensatz zur Generatorleistung ist die erforderliche Speicherkapazität im Einsatzprofil des Verteilerverkehrs geringer als im Fernverkehr. Zum einen ist die jeder Generatorleistung zugeordnete Leistungsaufnahme des Kühlaggregats geringer und zum anderen muss aufgrund der pro Strecke häufigeren Brems- und Verzögerungsvorgängen weniger Energie über längere Zeiträume vorgehalten werden. Im Einsatzprofil des Fernverkehrs erfordert demgegenüber die zur Fahrtmitte hügelige bis bergige Topographie eine höhere Speicherkapazität, um die negative Energiebilanz in den vor- und nachfolgenden Phasen auf flacher Autobahn zu kompensieren (vgl. auch Bild 5.16).

Mit dem Bewertungskriterium einer ausgeglichenen Energiebilanz lässt sich auf diese Weise für individuelle Einsatzprofile und mögliche mittlere elektrische Leistungsanforderungen des Kühlaggregats eine Aussage zur erforderlichen Generatorleistung und Speicherkapazität der Batterie treffen. Im Rahmen dieser Arbeit ist dies zunächst überschlägig auf Basis vereinfachter Annahmen zum Systemverhalten und Wirkungsgraden erfolgt. Sobald die Entscheidung für eine grundsätzliche Systemkonfiguration und -leistung gefallen ist, sind detailliertere Betrachtungen hinsichtlich der betriebspunktabhängigen Detailauslegung des Systems und einzelner Komponenten sowie der Betriebsstrategie im Zusammenspiel mit der Zugmaschine erforderlich. Nach einer entsprechenden Anpassung des Simulationsmodells wären die erzeugten Fahrzyklen auch hierfür einsetzbar.

6 Diskussion der Ergebnisse

Abschließend erfolgt eine kritische Betrachtung der entwickelten Methode und ihrer Anwendbarkeit zur Bewertung und Dimensionierung eines Bremsenergieerückgewinnungssystems am Kühlsattelaufleger. Darauf aufbauend wird auf die Übertragbarkeit der Methode auf verwandte Problemstellungen eingegangen.

6.1 Anwendbarkeit der Methode

Die entwickelte Methode umfasst eine formale Beschreibung des Fahrzeugeinsatzes, die automatisierte Erzeugung einsatzindividueller Fahrzyklen auf Basis dieser Beschreibung und die anschließende Simulation des Fahrzeugbetriebs zwecks Generierung der angestrebten Ergebnisse. Wie in den vorangegangenen Kapiteln durch den Abgleich von Mess- und Simulationsergebnissen beschrieben, lassen sich mit dieser Herangehensweise für das gewählte Beispiel die zurückgewinnbaren Bremsenergiemengen für Strecken mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Streckenart, Topographie und Beladungen bestimmen. In weitergehenden Analysen wurde das Bewertungskriterium einer ausgeglichenen Energiebilanz zur Grobdimensionierung des Systems für zwei exemplarische realitätsnahe Einsatzprofile und unterschiedliche mittlere elektrische Leistungsaufnahmen des Kühlaggregats erfolgreich angewandt. Damit ist die Anwendbarkeit der Methode und der erzeugten einsatzindividuellen Fahrzyklen zur Betrachtung und energetischen Bewertung der Bremsenergieerückgewinnung am Kühlsattelaufleger nachgewiesen.

Mit der entwickelten Beschreibungsform des Einsatzprofils können durch die Kombination der hinterlegten Klassen und die Definition von Ladevorgängen und Pausen beliebige Einsätze schwerer Nutzfahrzeuge im Straßengütertransport nachbildet werden. Dennoch bestehen Erweiterungsmöglichkeiten. Wird das betrachtete Fahrzeug während einer Fahrt oder eines Einsatztags teils mit oder ohne Anhänger betrieben, ließe sich dies ergänzend im Einsatzprofil vermerken (s. auch [Koh05]). Zwecks detaillierterer Nachbildung realer Einsatzprofile wäre zudem eine feinere Wahl der Klassen zur Berücksichtigung zusätzlicher Streckenarten oder topographischer Gegebenheiten möglich. Beispielsweise ließe sich der Streckentyp *Stadt* in einen leichten und schweren Betrieb unterteilen (vgl. [Bau04]) und der Typ *Landstraße* in überregionale oder regionale Strecken. Im Anwendungsbeispiel des temperaturgeführten Transports könnten hinsichtlich des Energiebedarfs der Kühlung die Außen- und Solltemperatur inklusive der thermischen Eigenschaften der Zuladung (z. B. Temperatur zu Fahrtbeginn, Wärmekapazität) im Einsatzprofil vorgegeben werden. Dies setzt allerdings eine Modellierung des komplexen thermischen Systems aus Umgebung, Kühlaggregat, Kühlkoffer und Zuladung sowie geeignete Messdaten zur Validierung voraus. Für die Zielstellung der vorliegenden Arbeit sind jedoch alle notwendigen Informationen im Einsatzprofil enthalten und mit der Annahme einer mittleren elektrischen Leistungsaufnahme des Kühlaggregats kann auf die zuletzt genannten Punkte verzichtet werden.

Die auf Basis des Einsatzprofils erzeugten Fahrzyklen sind aufgrund des gewählten weg- und ereignisbasierten Ansatzes für die Klasse der schweren Nutzfahrzeuge im Straßengütertransport fahrzeugunabhängig gültig und anwendbar. Mit der Vorgabe von Zielgeschwindigkeiten können sich Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge oder auch durch eine Untermotorisierung bedingte Geschwindigkeitseinbrüche an Steigungen in der Simulation frei einstellen. Ausschlaggebend hierfür sind lediglich die angenommenen Fahrzeugparameter und die im Simulationsmodell hinterlegte Regelstrategie des Fahrermodells. Durch diese automatische Anpassungsfähigkeit des Fahrzyklus an variierende Fahrzeugparameter ist die Anwendbarkeit in systematischen Parametervariationen, bei denen wie im vorliegenden Fall mit der installierten Generatorleistung auch die Fahrzeugmasse variiert wurde, gegeben.

Die hinterlegten Simulationsmodelle, sowohl das Fahrzeug als auch den Fahrer betreffend, sind zur durchgeführten Betrachtung der Bremsenergierückgewinnung und einer überschlüssigen Systemdimensionierung hinreichend genau. Lediglich für eine sich anschließende detaillierte Systemauslegung wäre eine exaktere und betriebspunktanhängige Modellierung des elektrischen Systems am Trailer und des Antriebsstrangs der Zugmaschine zur Einbeziehung des Mehrverbrauchs im Fahrentrieb notwendig. Grundsätzlich ist die Methode der Simulation mit wegbasiert vorgegebenen Zielgeschwindigkeiten und detaillierten Simulationsmodellen auch hierzu geeignet. Nicht zuletzt basieren die Strategien der Europäischen Kommission zur Bestimmung und Reduktion der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge auf einem entsprechenden Ansatz [COM14].

6.2 Übertragbarkeit auf weitere Problemstellungen

Durch die fahrzeugunabhängige Gestaltung der Methode und der Fahrzyklen sind diese auf verwandte Problemstellungen aus dem Bereich der schweren Nutzfahrzeuge im Straßengütertransport übertragbar. In [Dop14] wurde beispielsweise unter Anwendung der Methode für spezifische Klassen des Einsatzprofils der Kraftstoffverbrauch eines Sattelzugs simuliert. In [Süß15] erfolgte eine Gegenüberstellung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode zur Erzeugung einsatzindividueller wegbasierter Fahrzyklen und derjenigen nach Süßmann. Der durchgeführte Vergleich der erzeugten Fahrzyklen basiert auf einer Analyse des Energie- und Kraftstoffverbrauchs eines Sattelzugs für verschiedene Zuladungen. Ergänzend wurden Einsparpotentiale gängiger effizienzsteigernder Maßnahmen, in diesem Fall durch Verbesserungen in der Aerodynamik, in der Leermasse des Fahrzeugs sowie im Rollwiderstand der Reifen, bestimmt und verglichen. Sowohl der Vergleich der Einsparpotentiale als auch des Gesamtverbrauchs zeigen eine gute Übereinstimmung. Darüber hinaus wurden in systematischen Parametervariationen und unter Anwendung der Methode erreichbare Einsparpotentiale durch die Nutzung hybrid-elektrischer Fahrentriebe und deren energetische Vernetzung mit einem Bremsenergierückgewinnungssystem am Trailer untersucht (s. [Kat16] und [Vol16]). Da die Fahrzyklen lediglich eine Zielgeschwindigkeit vorgeben, lassen sich grundsätzlich auch wei-

tergehende effizienzsteigernde Fahr- und Regelstrategien untersuchen. Ein Beispiel ist der prädiktive Tempomat, der in Abhängigkeit der vorausliegenden Topographie Geschwindigkeitsschwankungen um die Zielgeschwindigkeit zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs nutzt. Die Übertragbarkeit der Methode ist somit gegeben, sie setzt lediglich und je nach Zielstellung eine Anpassung des Simulationsmodells voraus.

Neben dem reinen Straßengütertransport lassen sich anhand der Methode prinzipiell auch weitergehende Fahrzeuganwendungen mit zusätzlichem Arbeitsbetrieb betrachten. Mögliche Beispiele sind Stadtbusse oder auch Müllsammel- und Kehrfahrzeuge, die in der Regel zwischen einem Depot oder einer Abladestelle und dem eigentlichen Arbeits- bzw. Sammelgebiet pendeln (vgl. auch [Dem05]). Während sich die Überführungsfahrten mit dem bisherigen Einsatzprofil und den Fahrzyklen beschreiben lassen, erfordert die Abbildung des spezifischen Arbeitsbetriebs die Ergänzung entsprechender Klassen inklusive einer messtechnischen Erfassung des jeweiligen Betriebs. In den Messdaten wären analog des vorgestellten Vorgehens typische Betriebszustände während des Arbeitens zu identifizieren und voneinander abzugrenzen. Anschließend ließen sich je Klasse beschreibende Kenndaten ableiten, die zur Erzeugung eines kombinierten Fahr- und Arbeitszyklus mit fahrzeugunabhängig gültigen lastbeeinflussenden Größen heranzuziehen wären. Für das Kehrfahrzeug ließe sich beispielsweise die Menge des aufzunehmenden Kehrguts pro Fahrstrecke und deren statistische Verteilung zur Erzeugung des Arbeitszyklus nutzen. Für den Stadtbuss entsprächen diese Abgaben der Anzahl an Haltestellen pro Strecke in Kombination mit einer Vorgabe zu- oder aussteigender Fahrgäste.

Ausgehend von den genannten Nutzfahrzeugen mit Transport- und Arbeitsanteilen ist auch eine Übertragung der Methode auf den Bereich der mobilen Maschinen denkbar. Im Vergleich zur reinen Transportaufgabe werden bestimmte mobile Maschinen jedoch sehr universell eingesetzt. Ein Beispiel ist der Traktor, der je nach Anwender und Leistungsklasse u.a. zur Bodenbearbeitung, zur Aussaat, zum Pflanzenschutz, zu Ladearbeiten oder für Transportarbeiten genutzt wird. Dies erschwert in Kombination mit den komplexen Antriebsstrukturen mobiler Maschinen den Einsatz der Methode.

Unabhängig von der betrachteten Anwendung und dem jeweiligen Fahrzeug- oder Maschinentyp ist bei Anwendung der Methode auf eine klare und eindeutige Trennung der Klassen des Einsatzprofils zu achten. Entsprechend dieser Klassen muss sich die Datenbasis zur Ableitung der Kenndaten eindeutig unterteilen lassen, damit aussagekräftige Kenndaten gewährleistet sind. Bei Ableitung der Kenndaten ist auf den Ausschluss fahrzeug- und fahrerspezifischer Einflussgrößen zu achten, die gegebenenfalls in den Messdaten enthalten sind. Nur dann können fahrzeug- und fahrerunabhängige gültige Fahrzyklen erzeugt und vergleichbare Simulationsergebnisse gewonnen werden. Zuletzt wird ein an die Zielsetzung und den Betrachtungsgegenstand angepasstes Fahrzeug- und Fahrermodell benötigt, das alle relevanten Beziehungen und Einflussgrößen in ausreichender Weise abbildet..

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die stetig zunehmende Bedeutung des Kraftstoffverbrauchs bezüglich Betriebskosten, Ressourcenverbrauch und CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge im Straßengütertransport führt zur Entwicklung immer effizienterer Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen. Erreichbare Einsparungen hängen dabei vom tatsächlichen Fahrzeugeinsatz beim Anwender ab, der u.a. durch unterschiedliche Streckenlängen, variierende Zuladungen und regionale Einsatzbedingungen gekennzeichnet ist. Um im Rahmen des Entwicklungsprozesses oder bei der Konfiguration entsprechender Fahrzeuge simulationsgestützte Aussagen zu anwenderspezifischen Einsparpotentialen treffen zu können, sind geeignete einsatzindividuelle Fahrzyklen erforderlich. Standardisierte Fahrzyklen sind hierzu nicht geeignet, da in der Regel eine Abweichung zwischen dem beschriebenen und dem tatsächlichen Einsatz beim Fahrzeugbetreiber besteht.

Die vorliegende Arbeit greift diese Problematik auf und stellt eine Methode zur automatischen Erzeugung einsatzindividueller Fahrzyklen vor. Diese Fahrzyklen sind zur Nachbildung beliebiger Einsatzprofile schwerer Nutzfahrzeuge im Straßengütertransport geeignet und lassen sich zur Simulation des Fahrzeugbetriebs verwenden. Zur Gewährleistung aussagekräftiger und vergleichbarer Ergebnisse geben die Fahrzyklen eine Zielgeschwindigkeit und die Fahrbahnsteigung jeweils über dem Weg vor. Ergänzend sind der Zielgeschwindigkeit kurzfristige Verzögerungs- und Haltevorgänge in Form sogenannter Events überlagert. Zusätzlich beinhalten die Fahrzyklen einsatzindividuelle Ladevorgänge und den daraus resultierenden variablen Verlauf der Zuladung über der Fahrt. Die Erzeugung der Fahrzyklen basiert auf einer formalen Beschreibung des jeweiligen Fahrzeugeinsatzes und einer hinterlegter Datenbasis. Als Anwendungsbeispiel dient die Bremsenergieerückgewinnung am Kühlsattelaufleger zur elektrischen Versorgung des ansonsten dieselmotorisch betriebenen Kühlaggregats.

Einleitend wurde auf die Einordnung der Kühlsattelaufleger in die Fahrzeugklasse der schweren Nutzfahrzeuge und die Grundlagen der Bremsenergieerückgewinnung eingegangen. Zur Verdeutlichung technischer Realisierungsmöglichkeiten folgte die Vorstellung umgesetzter Beispiele und Konzepte zur Bremsenergieerückgewinnung am Sattelaufleger. Mit dem Ziel einsatzindividueller Betrachtungen wurde der Fokus anschließend auf energetisch-orientierte Bewertungsansätze, standardisierte Einsatzbeschreibungen und existierende Methoden zur Generierung von Fahrzyklen gelegt.

Aus den Darstellungen leitete sich die Notwendigkeit einer Methode zur Erzeugung einsatzindividueller Fahrzyklen ab, die zur Abbildung beliebiger realitätsnaher Einsatzprofile schwerer Nutzfahrzeuge im Gütertransport geeignet sind. Es wurde eine formale Beschreibungsform für individuelle Fahrzeugeinsätze vorgestellt, die in Kombination mit einer hinterlegten Datenbasis die Vorgabe zur Erzeugung der einsatzindividuellen Fahrzyklen bildet. Die genannte Datenbasis beschreibt dabei das statistische Verhalten der durch den Fahrzyklus vorgegebenen Zielgeschwindigkeit, Events und Fahrbahnsteigung. Zur Ableitung der jeweiligen statistischen Kenn-

daten aus einsatzübergreifend durchgeführten Messungen wurde eine geeignete Vorgehensweise zur Klassierung und Auswertung der Messdaten entwickelt. Mit Vorliegen der Kenndaten lassen sich mittels der vorgestellten Algorithmen die benötigten Fahrzyklen synthetisch erzeugen. Abschließend wurde verdeutlicht, wie sich aufgrund des gewählten Ansatzes bestimmte Vorgabegrößen auf die Gestalt der erzeugten Fahrzyklen auswirken.

Zwecks Validierung der Methode und der erzeugten Fahrzyklen erfolgte ein Abgleich von Mess- und Simulationsergebnissen am Beispiel der Bremsenergierückgewinnung am Kühltelaufleger. Die Messungen wurden mit einem aufgebauten Versuchsträger im Rahmen des Projekts „Electric powered Energy-Efficient Trailer“ (E³-Trail) durchgeführt. Sowohl der Versuchsträger und die mit ihm gewonnenen Messergebnisse als auch das aufgebaute Simulationsmodell des Fahrzeugs wurden in diesem Zusammenhang näher vorgestellt. Nach erfolgreicher Validierung konnte die Methode in weitergehenden Analysen zur überschlägigen Dimensionierung des Bremsenergierückgewinnungssystems für realitätsnahe Einsatzprofile und unterschiedliche elektrische Leistungsaufnahmen des Kühltelaggregats angewandt werden.

Abschließend wurden die Anwendbarkeit und die Übertragbarkeit der Methode auf verwandte Problemstellungen kritisch beleuchtet. Es konnte gezeigt werden, dass die erzeugten Fahrzyklen zur einsatzindividuellen Bewertung der Bremsenergierückgewinnung am Kühltelaufleger geeignet sind und sich aufgrund der fahrzeugunabhängigen Gestaltung grundsätzlich zur Effizienz- und Verbrauchsbewertung schwerer Nutzfahrzeuge einsetzen lassen. Lediglich die Datenbasis und das verwendete Simulationsmodell erfordern eine Anpassung an die jeweilige Zielstellung und den Betrachtungsgegenstand.

Eine Erweiterung des Einsatzprofils und der Datenbasis um zusätzliche Klassen und Kenndaten kann wie beschrieben die zukünftige Anwendung der Methode auf weitere Fahrzeugtypen und deren Einsätze ermöglichen. Hinzuweisen ist auch auf eine mögliche Kombination der Methode mit einer Betriebskostenrechnung und die anschließenden Anwendung im Produktmanagement oder Vertrieb eines Herstellers, um für einzelne Fahrzeugbetreiber und deren individuelle Einsatzprofile das Potential technischer Maßnahmen auch monetär zu bewerten und darauf aufbauend das geeignetste Fahrzeug konfigurieren und anbieten zu können.

Bezogen auf die Bremsenergierückgewinnung am Kühltelaufleger wären notwendige weitere Schritte die anwendungs- und herstellungsgerechte Detailauslegung des Gesamtsystems, einzelner Komponenten und fahrzeugübergreifender Regel- und Betriebsstrategien unter Einbeziehung des konventionellen Bremssystems. Hinsichtlich aufkommender energetischer Fragestellungen ist auch in diesem Zusammenhang die entwickelte Methode einsetzbar.

8 Literaturverzeichnis

- [And04] André, M.: The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. In *The Science of the total environment*, 2004, 334-335; S. 73–84.
- [App08] Appel, W.: *Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten*; mit 35 Tabellen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [Arn07] Arning, J.; Mayer, W.; Wiedemann, J.: Die Fahrzeug-Energieeffizienzkennzahl. Der Wirkungsgrad des Fahrzeugs. *Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (2007) H. 5, S. 430-437.
- [ATP10] -, -: ATP as amended on 2 January 2011. Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to Be Used for Such Carriage (ATP). United Nations, New York, 2010.
- [Bal15] Balau, A. E. et al.: Stochastic Real-World Drive Cycle Generation Based on a Two Stage Markov Chain Approach. In *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2015, 8.
- [Bar09a] Barlow, T. J.: A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. Version 3. IHS, Bracknell, 2009.
- [Bar09b] Barnitt, R. A. et al.: Emissions of Transport Refrigeration Units with CARB Diesel, Gas-to-Liquid Diesel and Emissions Control Devices: SAE 2009 Powertrains Fuels and Lubricants Meeting. SAE International, Warrendale, PA, United States, 2009.
- [Bau04] Baumann, A. et al.: Standardisierte Straßen-Testzyklen - SORT - zum Vergleich von Antriebsträngen (Getrieben) in Niederflurbussen: Getriebe in Fahrzeugen. Tagung Friedrichshafen, 22. und 23. Juni 2004. VDI Verlag, Düsseldorf, 2004; S. 783–799.
- [Bau14] Baumgarten, T.: Zur statistischen Bedienermodellierung mobiler Arbeitsmaschinen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Shaker Verlag, Aachen, 2014.
- [Ben15] Bender, F. A.; Sawodny, O.: Development of a refuse truck driving cycle collective based on measurement data. In *International Journal of Environment and Waste Management*, 2015, 15; S. 99–113.
- [Ber05] Bernardi, M.: Gestaltung eines mechatronikorientierten Entwicklungsprozesses für mobile Arbeitsmaschinen und des dazugehörigen Entwicklungsumfeldes. Dissertation. Univ. des Saarlandes, Lehrst. für Fertigungstechnik, Saarbrücken, 2005.

- [Böh13] Böhme, T. J. et al.: Application of an Optimal Control Problem to a Trip-Based Energy Management for Electric Vehicles. In SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2013, 2; S. 115–126.
- [BPW12] -, -: Energierückgewinnung am Trailer. BPW veröffentlicht zukunftsorientierte Konzeptstudie zu ECO Vision E. Presseinformation der BPW Bergische Achsen, Hannover/Wiehl, 2012.
- [BPW16] -, -: eSolutions von BPW. Elektrisierende Ideen für emissionsfreien Antrieb und Energiegewinnung im Trailer. Presseinformation der BPW Bergische Achsen, Hannover/Wiehl, 2016.
- [Bru00] Bruneel, H.: Heavy Duty Testing Cycles Development: A New Methodology: CEC/SAE Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition. SAE International, Warrendale, PA, United States, 2000.
- [Can07] Cantner, U.; Krüger, J.; Hanusch, H.: Produktivitäts- und Effizienzanalyse. Der nichtparametrische Ansatz. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [CAR16] -, -: Carrier Transicold - Vector. Produktbroschüre, 2016.
- [Che14] Chen, H. et al.: Game-Theoretic Approach for Complete Vehicle Energy Management: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014.
- [COM14] -, -: Strategy for reducing Heavy-Duty Vehicles' fuel consumption and CO2 emissions. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Brussels, 21.5.2014.
- [Deg03] Degrell, O.; Feuerstein, T.: "DLG-PowerMix". Ein praxisorientierter Traktorentest. In (VDI-MEG Hrsg.): LAND. TECHNIK - AgEng 2003. Tagung Hannover, 7. und 8. November 2003. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003; S. 339–345.
- [Deg05] Degrell, O.; Feuerstein, T.: "DLG-PowerMix". Ein praxisorientierter Traktorentest - "Testzyklen". In (VDI-MEG Hrsg.): LAND. TECHNIK - AgEng 2005. Tagung Hannover, 4. und 5. November 2005. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005; S. 65–76.
- [Dei09] Deiters, H.: Standardisierung von Lastzyklen zur Beurteilung der Effizienz mobiler Arbeitsmaschinen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Shaker Verlag, Aachen, 2009.
- [Dem02] Dembski, N.; Guezenec, Y.; Soliman, A.: Analysis and Experimental Refinement of Real-World Driving Cycles: SAE World Congress & Exhibition. SAE International, Warrendale, PA, United States, 2002.
- [Dem05] Dembski, N. et al.: Development of Refuse Vehicle Driving and Duty Cycles: SAE World Congress & Exhibition. SAE International, Warrendale, PA, United States, 2005.

- [DGC14] -, -: Working document for the methodology drafting for the CO₂ monitoring of HD vehicles. European Commission, DG Clima, 15.05.2014.
- [Dib13] Diba, F.; Esmailzadeh, E.: A new parallel-series configuration for hybridization of a line-haul truck: 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013; S. 1–6.
- [DIE15] -, -: World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC). Homepage DieselNet, <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php>, aufgerufen am 14.09.2015.
- [DIN70] -, -: DIN 70010: Systematik der Straßenfahrzeuge. Begriffe für Kraftfahrzeuge, Fahrzeugkombinationen und Anhängerfahrzeuge.
- [Dop13a] Dopichay, T. et al.: Energierückgewinnung bei gezogenen Einheiten am Beispiel eines Kühlsattelauflegers: Truck, Bus, Van, Trailer. 12. Internationale Fachtagung Nutzfahrzeuge; Celle, 5. und 6. Juni 2013. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2013; S. 31–41.
- [Dop13b] Dopichay, T. et al.: Recuperation of energy for operating the cooling unit of a refrigerated semitrailer. Technical concept and objectives of the project E3-Trail: Hybrid and Electric Vehicles. 10th Symposium, 13.-14.02.2013, Braunschweig; S. 203–219.
- [Dop14] Dopichay, T.; Frerichs, L.; Lang, T.: Weg- und ereignisbasierte Fahrzyklen zur einsatzindividuellen Effizienzbewertung schwerer Nutzfahrzeuge: 6. Grazer Nutzfahrzeug Workshop. Technische Universität Graz, Institut für Fahrzeugtechnik, 16. Mai 2014.
- [Dre75] Dreyer, W.: Stochastischer Fahrzyklus für Stadt-Linienomnibusse. Sonderforschungsbereich 97, Fahrzeuge und Antriebe, Teilprojekt Stadtkraftfahrzeuge, Bericht-Nr. 34, Technische Universität Braunschweig, 1975.
- [Dün15] Dünnebeil, F. et al.: Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Texte 32/2015, 2015.
- [Dun89] Duntelman, G. H.: Principal Components Analysis. SAGE Publications, 1989.
- [Dwy05] Dwyer, H. A. et al.: Transport refrigeration unit emissions and fuel consumption: 98th Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition. Minneapolis, MN; United States; 21-24 June 2005, 2005.
- [ECE13] -, -: Proposal for a new UN Global Technical Regulation on Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP). ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2013/13, United Nations, Economic Commission for

- Europe, Inland Transport Committee, World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, Working Party on Pollution and Energy, 2013.
- [EGR07] -, -: Richtlinie 2007/46/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Union, 2007.
- [EGR09] -, -: Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, Amtsblatt der Europäischen Union, Amtsblatt der Europäischen Union.
- [EGR13] -, -: Leitlinien vom 5. November 2013 für die gute Vertriebspraxis von Humanarzneimitteln (2013/C 343/01), Amtsblatt der Europäischen Union, 2013.
- [EGR93] -, -: Richtlinie 93/116/EG der Kommission vom 17. Dezember 1993 zur Anpassung der Richtlinie 80/1268/EWG des Rates über den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 1993.
- [Elm14a] Elmer, M. et al.: Transformers HVTT13 conference report. In: 13th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology, San Luis, Argentina, 27th - 30th October 2014.
- [Elm14b] Elmer, M. et al.: Configurable and Adaptable Trucks and Trailers for Optimal Transport Efficiency. In: IEEE Conference and Expo Transportation Electrification, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, China, 31 August - 3 September 2014. IEEE, Piscataway, NJ, 2014.
- [Eng14] Engstle, A. et al.: Elektrifizierter Antriebsstrang. Mehr Effizienz durch vorausschauendes Energiemangement. In ATZ elektronik, 2014, 9.
- [EPC99] -, -: Directive 1999/96/EC of the European Parliament and of the Council of 13 December 1999 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles and amending Council Directive 88/77/EEC, 1999.
- [Eti01] Etienne, J.-P.: Standardised On-Road Test Cycles - SORT. A project of the UITP Bus Committee in collaboration with manufacturers: 54th UITP International Congress. London, 20-25 May 2001.

- [EWG91] -, -: Richtlinie des Rates vom 26. Juni 1991 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 1991.
- [Fei97] Feigl, E. et al.: Betriebsweisen von Verteiler-LKW in Verdichtungsräumen. Technischer Schlußbericht. MAN Nutzfahrzeuge AG, München, 1997.
- [Fil05] Filla, R.: Operator and Machine Models for Dynamic Simulation of Construction Machinery. Linköpings Universitet, Division of Fluid and Mechanical Engineering Systems, Department of Mechanical Engineering, Licentiate Thesis, 2005.
- [Fle13] Fleczonek, T.: Effizienzbewertung von Antrieben mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel eines Mähdreschers. Shaker, Aachen, 2013.
- [Fug10] Fugel, M.: Parallele Hybridantriebe im Kundenbetrieb. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Shaker Verlag, Aachen, 2010.
- [FZV11] -, -: Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr - Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV), 2011.
- [Gal14] Gallo, J.-B.: Development of Representative Regional Delivery Drive Cycles for Heavy-Duty Truck Tractors. In SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2014, 7; S. 337–347.
- [Gon11] Gong, Q. et al.: An Iterative Markov Chain Approach for Generating Vehicle Driving Cycles. In SAE International Journal of Engines, 2011, 4; S. 1035–1045.
- [GRP15] -, -: Transposition of WLTP into EU Regulations and UN/ECE Regulations. Informal document GRPE-71-19-Rev.1, 71st GRPE, 8-12.06.2015.
- [Grü12] Grünig, G.: Dr. Jekyll und Mr. Hide. In VerkehrsRundschau, Springer Fachmedien, Ausgabe 31-32/2012, S. 76-80.
- [Hea10] Heap, R. D.: Guide to refrigerated transport. International Institute of Refrigeration (IIR), Paris, 2010.
- [Hel07] Helbig, A.: Energieeffizientes elektrisch-hydrostatisches Antriebssystem am Beispiel der Kunststoff-Spritzgießmaschine. Dissertation, Technische Universität Dresden. Shaker, Aachen, 2007.
- [IMD09] -, -: Rechentool macht Ersparnisse transparent. In imdialog - Magazin für Kunden und Partner, Linde Material Handling, Ausgabe 2, 2009; S. 4–5.
- [Jan07] Janßen, A.: Repräsentative Lastkollektive für Fahrwerkskomponenten. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Shaker Verlag, Aachen, 2007.

- [Joh05] Johannesson, L.: Development of a Time Invariant Stochastic Model of a Transport Mission. Technical Report no R023/2005, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2005.
- [Kat16] Kattenberg, T.; Vollmer, T.; Frerichs, L.: Recuperation and distribution of brake energy on truck-trailer combinations: Hybrid and Electric Vehicles. 13th Symposium, 23.-24.02.2016, Braunschweig; S. 287–306.
- [KBA13] Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten, 2013.
- [Kel00] Kelp, R.: Strategische Entscheidungen der europäischen Lkw-Hersteller im internationalen Wettbewerb. VVF, München, 2000.
- [Koh05] Kohrs, C.: Technisch-wirtschaftliche Auslegung von Antriebsstrangsystemen für Nutzfahrzeuge. Dissertation, Technischen Universität Dresden, 2005.
- [Koh08] Kohmäscher, T.: Modellbildung, Analyse und Auslegung hydrostatischer Antriebsstrangkonzeppte. Dissertation RWTH Aachen. Shaker Verlag, Aachen, 2008.
- [KRO16] -, -: KRONE Cool Liner SDR 27 eL4-S. Technisches Datenblatt, 2016.
- [Küç90] Küçükay, F.: Rechnergestützte Getriebedimensionierung mit repräsentativen Lastkollektiven. In ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 1990, 92; S. 328–333.
- [Küç92] Küçükay, F.; Brandt, H.; Seichert, R.: Berechnungsmethoden zur Optimierung von Automatikgetrieben. In ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 1992, 94; S. 134–141.
- [Kul07] Kulkarni, C.; Dwyer, H. A.: Modeling and Performance of Trailer Refrigeration Units with Alternative Power Systems: SAE World Congress & Exhibition. SAE International, Warrendale, PA, United States, 2007.
- [LaC12] LaClair, T. J.: Application of a Tractive Energy Analysis to Quantify the Benefits of Advanced Efficiency Technologies for Medium- and Heavy-Duty Trucks Using Characteristic Drive Cycle Data. In SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2012, 5; S. 141–163.
- [Lan02] Lang, T.: Mechatronik für mobile Arbeitsmaschinen am Beispiel eines Dreipunktkrafthebers. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Shaker Verlag, Aachen, 2002.
- [Lan11] Lang, T.: Hydraulische Antriebstechnik in mobilen Arbeitsmaschinen. Habilitation, Technische Universität Braunschweig. Shaker Verlag, Aachen, 2011.
- [Lei14] Leichtfried, J.: Bericht über den Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 96/53/EG vom 25. Juli

- 1996 zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr. Europäisches Parlament, Ausschuss für Verkehr und Fremdenverkehr, 27.3.2014.
- [Lie13] Liesen, J.; Dopichay, T.: Einsparpotential im Kühlfahrzeug durch Rekuperation. In Internationales Verkehrswesen, 2013, 65; S. 66–68.
- [Lie14] Liebl, J. et al.: Energiemanagement im Kraftfahrzeug. Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Lis06] Liscouet, J. et al.: Continously Variable Transmission for Truck Applications - Secondray Control versus Power Split. Proceedings of 5th International Fluid Power Conference, Aachen, March 20-22, 2006, pp. 25-44.
- [LMH09] -, -: Neuer TÜV-zertifizierter Gabelstapler-Leistungstest macht die Umschlagleistung zum objektiven Entscheidungskriterium. Pressemitteilung Linde Material Handling, Aschaffenburg/Fulda, 12. Februar 2009.
- [LOT11] Hill, N. et al.: Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles - Lot 1: Strategy. Final Report to the European Commission, DG Climate Action, Ref: DG ENV. 070307/2009/548572/SER/C3, 22.02.2011.
- [LOT12] Rexeis, M. et al.: Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles - LOT 2. Development and testing of a certification procedure for CO₂ emissions and fuel consumption of HDV, Final Report, DG CLIMA Contract N° 070307/2009/548300/SER/C3, 09.01.2012.
- [Luz14] Luz, R. et al.: Development and validation of a methodology for monitoring and certification of greenhouse gas emissions from heavy duty vehicles through vehicle simulation. Final Report by order of European Commission, DG Clima, Report No. I 07/14/Rex EM-I 2012/08 699 from 25.06.2014.
- [LWB15] -, -: Liebherr Radlader L 550 - L 580. Produktbroschüre Liebherr-Werk Bischofshofen GmbH, 2015.
- [Mad07] Mader, P. et al.: Emissions, Performance and Duty Cycle Measurements of Diesel Powered TRUs: SAE World Congress & Exhibition. SAE International, Warrendale, PA, United States, 2007.
- [Mar05] Martinus, M. A.: Funktionale Sicherheit von mechatronischen Systemen bei mobilen Arbeitsmaschinen. Dissertation, Technische Universität München. VDI-Verl., Düsseldorf, 2005.

- [Mas15] Maschmeyer, H.; Kluin, M.; Beidl, C.: Real Driving Emissions. Ein Paradigmenwechsel in der Entwicklung. In MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 2015, 76; S. 36–41.
- [Mid11] Midgley, W.; Cebon, D.: Specifying a hydraulic regenerative braking system for an articulated urban delivery vehicle: 7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011. Chicago, IL, US, 06.-09.09.2011.
- [Mid12] Midgley, W. J.; Cebon, D.: Comparison of regenerative braking technologies for heavy goods vehicles in urban environments. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2012, 226; S. 957–970.
- [Mid13] Midgley, W.; Cathcart, H.; Cebon, D.: Modelling of hydraulic regenerative braking systems for heavy vehicles. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013, 227; S. 1072–1084.
- [Mit14] Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Mül02] Müller-Kose, J.-P.: Repräsentative Lastkollektive für Fahrzeuggetriebe. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Shaker Verlag, Aachen, 2002.
- [Pac92] Pacejka, H. B.; Bakker, E.: THE MAGIC FORMULA TYRE MODEL. In Vehicle System Dynamics, 1992, 21; S. 1–18.
- [Par13] Park, J.; Lee, J.-H.; Lee, J.: Development of Driving Cycle for CO2 Emission Test of Heavy-Duty Vehicles: SAE/KSAE International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. SAE International, Warrendale, PA, United States, 2013.
- [PBG61] -, -: Personenbeförderungsgesetz (PBefG), Neugefasst durch Bek. v. 8.8.1990 I 1690; zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 147 G v. 7.8.2013 I 3154, 1961.
- [Per11] Perhinschi, M. G. et al.: Evolutionary Algorithm for Vehicle Driving Cycle Generation. In Journal of the Air & Waste Management Association, 2011, 61; S. 923–931.
- [Raa13] Raaz, A. et al.: Simulation der Rekuperations- und Kraftstoffesparpotenziale eines Energierückgewinnungssystems im Trailer: VPC - Virtual Powertrain Creation, Simulationsmethoden für die Antriebsentwicklung im Gesamtfahrzeugkontext, 15. MTZ-Fachtagung, Mainz, 24.-25. Sep, 2013.
- [Rom14] Romijn, T. et al.: A dual decomposition approach to complete energy management for a heavy-duty vehicle: IEEE 53rd Annual Conference on Decision and Control (CDC), 2014; S. 3304–3309.
- [Ros13] Rossenbach, B.: Der Trailer als Minikraftwerk - ECO Vision E: 2. lastauto omnibus Zukunftskongress. 24.-25. September 2013, Ludwigsburg.

- [Sch13] Schwarzer, V.; Ghorbani, R.: Drive Cycle Generation for Design Optimization of Electric Vehicles. In IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62; S. 89–97.
- [Sim89] Simon, W.: Methode zur parametrischen Anpassung von Fahrzyklen an die wechselnden Verkehrsabläufe im Straßenverkehr. Dissertation, RWTH Aachen, 1989.
- [Sta07] Stang, C.; Schoch, M.; Konopka, A.: Deutsches Wörterbuch. Auf der Grundlage der neuen amtlichen Rechtschreibregeln. Dudenverlag, Mannheim, 2007.
- [Ste09] Steindorff, K.; Lang, T.; Harms, H.-H.: Betriebsstrategien zur Energierückgewinnung an einem hydraulischen Antrieb. In: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe, 2009.
- [Sur10] Surcel, M.-D.; Michaelsen, J.: Feasibility Study of a Heavy-duty Tractor - Motorized Semi-trailer Hybrid Electric Combination. In SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2010, 3; S. 69–89.
- [Süß15] Süßmann, A. et al.: Erzeugung und Anwendung von kundenspezifischen Fahrzyklen bei schweren Nutzfahrzeugen: 4. VDI-Fachkonferenz Getriebe in Nutzfahrzeugen. Friedrichshafen, 16. und 17. Juni 2015.
- [SVZ12] -, -: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), durch Artikel 2 der Verordnung vom 9. März 2015 (BGBl. I S. 243) geändert, 2012.
- [Tas09] Tassou, S. A.; De-Lille, G.; Ge, Y. T.: Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. In Applied Thermal Engineering, 2009, 29; S. 1467–1477.
- [Thi11] Thiebes, P.; Vollmer, T.: Modellierung des Fahrers zur Untersuchung von Antriebssträngen in 1D-Simulationen am Beispiel eines Radladers mit Hybridantrieb. In: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, 3. Fachtagung, 17. Februar 2011. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2011.
- [Thi12] Thiebes, P.: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. Dissertation Karlsruher Institut für Technologie. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012.
- [THT15] -, -: Twan Heetkamp Trailers - New Cool. <http://thtrailers.de/de/new-cool>, aufgerufen am 03.09.2015.
- [TIN15] -, -: Trailer Innovation 2015: Valx - Trailerachse für die Gewinnung elektrischer Energie. <http://trailer-innovation.com/startseite/33-teilnehmer/environment/403->

valx-trailerachse-fuer-die-gewinnung-von-elektrischer-energie, aufgerufen am 14.07.2015.

- [VAL13] -, -: Valx E2! Axle. Technisches Datenblatt, 2013.
- [VDI02] -, -: VDI-Richtlinie 2198. Typenblätter für Flurförderzeuge. Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [VDI33] -, -: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. VDI Richtlinie 3633.
- [Vol16] Vollmer, T.; Kattenberg, T.; Frerichs, L.: Energieverteilung bei hybridisierten Sattelzügen: 4. Internationales Commercial Vehicle Technology Symposium Kaiserslautern. Technische Universität Kaiserslautern, 8.-10.03.2016; S. 169–178.
- [Web09] Weber, W.; Kabst, R.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Gabler, Wiesbaden, 2009.
- [Wei14] Weiler, B.: Kundenrelevante Auslegung von Nutzfahrzeugen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Shaker Verlag, Aachen, 2014.
- [Wit11] Wittenbrink, P.: Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr. Grundlagen - Optimierungspotenziale - Green Logistic. Gabler, Wiesbaden, 2011.
- [Zei10] Zeitzen, F.: Von Runde zu Runde. In lastauto omnibus, 2010; S. 16–17.
- [Zou04] Zou, Z. et al.: A New Composite Drive Cycle for Heavy-Duty Hybrid Electric Class 4-6 Vehicles: SAE World Congress & Exhibition. SAE International, Warrendale, PA, United States, 2004.
- [Zwa06] Zwahr, A.: Brockhaus Enzyklopädie. In 30 Bänden. F.A. Brockhaus, Leipzig, Mannheim, op. 2006.